

Untersuchungen zum Einsatz der Augmented Reality  
Technologie für Soll/Ist-Vergleiche von Betriebsmitteln  
in der Fertigungsplanung

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur (Dr.-Ing.)**

angenommen durch die Fakultät für Informatik  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von: Dipl.-Ing.-Inf. Christian Bade  
geb. am 11.09.1981 in Stendal

Gutachterin/Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Paul, OvGU Magdeburg

Prof. Dr. Werner Schreiber, Volkswagen AG

Prof. Gudrun Klinker, Ph.D. TU München

Ort und Datum des Promotionskolloquiums: Magdeburg, 24.09.2012

Diese Dissertation wird im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe im Logos Verlag Berlin veröffentlicht.

<http://www.logos-verlag.de>

## Vorwort

Viele Menschen haben mich aktiv beim Erstellen dieser Dissertation unterstützt. Diesen Personen möchte ich an dieser Stelle meinen ausdrücklichen Dank aussprechen.

Wissenschaftlich betreut wurde die Arbeit von Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Georg Paul, dem ich für sein fachliches Interesse, die tatkräftige Unterstützung bei gemeinsamen Konferenzbeiträgen und viele anregende und motivierende Gespräche danke. Ebenfalls danke ich Frau Prof. Gudrun Klinker und Herrn Prof. Dr. Werner Schreiber für die kritische Auseinandersetzung mit der Arbeit und Ihre Unterstützung als Zweit- und Drittgutachter.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit im Bereich der Karosseriebauplanung bei der Volkswagen AG in Wolfsburg. In diesem Zusammenhang danke all meinen Kollegen der Markenplanung bei Volkswagen, die mich während dieser Zeit begleitet und gefördert bzw. durch kritische Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders hervorzuheben sind hierbei Dipl.-Ing. Carsten Macke und Dipl.-Wirtsch.-Ing. Andreas Hoffmeyer, die mich bei vielen Versuchen und Pilotprojekten unterstützten. Zudem möchte ich einen großen Dank an die Kollegen des VR-Labors aussprechen, die mir durch ihre Beratung und fachlichen Diskussionen stets eine große Hilfe waren. Hier sind Dipl.-Ing. Fabian Doil und Dipl.-Ing. Ulrich Rautenberg hervorzuheben, die mich im Rahmen unserer gemeinsamen Projektarbeit stets inspiriert und motiviert haben. Weiterhin danke ich Dr. Johannes Tümler für das intensive Korrekturlesen der Arbeit sowie allen Studenten, Diplomanden und Probanden, die mich während der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ein Dankeschön geht an dieser Stelle auch an die Kollegen der metaio GmbH aus München. Frau Dr.-Ing. Katharina Buckl danke ich für die tatkräftige und fruchtbare Zusammenarbeit bei gemeinsamen Versuchen und Konferenzbeiträgen, sowie ihre hilfreichen Hinweise und Korrekturen. Ebenso danke ich Dipl.-Ing. Marion Langer und Dipl.-Inf. Wilm Tomaszek-Staude, die mich mit Humor und Fachwissen bei vielen Untersuchungen unterstützt haben.

Zuletzt gilt mein ganz besonderer Dank meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Richard und Christina dafür, dass sie mich seit vielen Jahren unterstützen und dadurch diese Arbeit überhaupt erst ermöglichten. Aus tiefstem Herzen danke ich meiner Partnerin Maria, deren großes Verständnis und permanente Unterstützung mir die Kraft zum Fertigstellen dieser Arbeit gegeben haben.



## **Kurzfassung**

Die Geschwindigkeit und die Komplexität aktueller Produktentwicklungen in der Automobilindustrie sind heute ohne die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik nicht beherrschbar. Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Augmented Reality (AR) Technologie als Werkzeug für Soll/Ist-Vergleiche im Rahmen der Digitalen Fabrik.

Für die erfolgreiche Anwendung der Digitalen Fabrik müssen die Daten und Informationen der digitalen Modelle mit der realen Fabrik übereinstimmen. Die Augmented Reality bietet das Potenzial, die Aktualität des Datenbestandes zu verifizieren. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, die AR-Technologie für Soll/Ist-Vergleiche von Betriebsmitteln in der Fertigungsplanung zu untersuchen und nutzbar zu machen. Es fand eine Analyse eines Vergleichsprozesses mit Augmented Reality statt. Im Ergebnis zeigte sich neben technischem vor allem prozess- und anwendungsspezifisches Optimierungspotenzial. Der Fokus lag auf der Verbesserung des Registrierungsprozesses in industriellen Produktionsumgebungen und der Auswertung von AR-Informationen.

## **Abstract**

Today the speed and complexity of product development processes in the automotive industry are not manageable without methods and tools of the Digital Factory. This thesis deals with augmented reality technology as a tool for discrepancy checks in the context of the Digital Factory.

The successful application of the Digital Factory requires the data and information of the digital models to match with the real factory. Augmented Reality holds potential to verify the accuracy of digital models. This contribution aims to explore and utilize the AR technology for discrepancy checks of equipment in the production planning. An analysis of an Augmented Reality based discrepancy check is presented. The results show not only technical but also process- and application-specific optimization potential. The thesis focuses on improving the registration process within industrial production environments and the evaluation of AR scenarios.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>MOTIVATION UND ZIELSETZUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	AUSGANGSSITUATION .....	1
1.2	AUFGABENSTELLUNG - ZIEL DER ARBEIT .....	2
1.3	AUFBAU DER ARBEIT .....	3
<b>2</b>	<b>WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN .....</b>	<b>7</b>
2.1	AUGMENTED REALITY .....	7
2.1.1	<i>Definition</i> .....	7
2.1.2	<i>Technologien und Systemarchitektur</i> .....	8
2.1.2.1	Tracking Technologien .....	9
2.1.2.2	Visualisierungstechniken .....	14
2.1.2.3	Visualisierungsarten .....	17
2.1.2.4	Komponenten eines AR-Systems .....	18
2.1.3	<i>Anwendungen</i> .....	19
2.1.3.1	Entertainment .....	19
2.1.3.2	Edutainment .....	20
2.1.3.3	Medizin .....	21
2.1.3.4	Militär .....	21
2.1.3.5	Architektur und Geografie .....	22
2.1.3.6	Industrie .....	22
2.1.4	<i>Zusammenfassung, mobile und stationäre AR-Systeme</i> .....	24
2.2	FABRIKPLANUNG .....	25
2.2.1	<i>Definitionen</i> .....	25
2.2.2	<i>Planungsfälle und Planungsursachen</i> .....	26
2.2.3	<i>Planungsziele und -inhalte</i> .....	27
2.2.4	<i>Produktionsplanung</i> .....	28
2.3	DIE DIGITALE FABRIK .....	31
2.3.1	<i>Definition</i> .....	32
2.3.2	<i>Ziele</i> .....	33
2.3.3	<i>Funktionen und Techniken der Digitalen Fabrik</i> .....	33
2.4	SOLL/IST-VERGLEICHE .....	37
2.4.1	<i>Definition</i> .....	38
2.4.2	<i>Entstehen von Soll/Ist-Abweichungen</i> .....	39
2.4.3	<i>Abgrenzung</i> .....	40
2.4.4	<i>Messtechnik</i> .....	41
2.4.4.1	Grundlagen .....	41
2.4.4.2	Definitionen .....	42
2.4.4.3	Allgemeiner Messvorgang .....	43
2.4.5	<i>Registrierungsmethoden</i> .....	44
2.4.5.1	2D-2D Bildregistrierung .....	45
2.4.5.2	3D-3D Punktregistrierung .....	46
2.4.5.3	2D-3D Punktregistrierung .....	48
2.4.5.4	6D-6D Registrierung .....	49
2.4.5.5	Fazit .....	50
<b>3</b>	<b>STAND DER TECHNIK .....</b>	<b>51</b>
3.1	SOLL/IST-VERGLEICHE HEUTE .....	51
3.1.1	<i>Handaufmaß</i> .....	52
3.1.2	<i>Tachymetrie</i> .....	53
3.1.3	<i>Laserscannen</i> .....	54
3.1.4	<i>Photogrammetrie</i> .....	55
3.2	AUGMENTED REALITY BASIERTE SOLL/IST-VERGLEICHE .....	56
3.2.1	<i>Verwandte Arbeiten</i> .....	56
3.2.2	<i>Handlungsbedarf</i> .....	58
3.2.3	<i>Marktübersicht Augmented Reality Systeme</i> .....	60

3.2.4	<i>Unifeye Planner</i> .....	64
3.2.4.1	Historische Entwicklung .....	64
3.2.4.2	Architektur .....	68
3.2.4.3	Trackingschnittstellen .....	68
3.2.4.4	Zusammenfassung .....	68
3.3	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHWERPUNKTAUSWAHL .....	69
<b>4</b>	<b>ANFORDERUNGSANALYSE</b> .....	<b>71</b>
4.1	BETRIEBSMITTEL .....	71
4.1.1	<i>Betriebsmittellebenszyklus</i> .....	71
4.1.2	<i>Betriebsmittel im Karosseriebau</i> .....	72
4.1.2.1	Produktionsbezogene Eingliederung des Karosserierohbaus .....	72
4.1.2.2	Aufbau und Strukturierung des Karosserierohbaus .....	73
4.1.2.3	Aufbau und Strukturierung von Fertigungsstationen .....	74
4.1.3	<i>Bezugssysteme und Referenzpunkte</i> .....	75
4.1.4	<i>Abgrenzung der untersuchten Betriebsmitteleigenschaften</i> .....	77
4.2	GEOMETRISCHE ABWEICHUNGEN .....	78
4.2.1	<i>Abweichungsursachen</i> .....	78
4.2.1.1	Prozessbedingte Ursachen .....	78
4.2.1.2	Systembedingte Ursachen .....	81
4.2.1.3	Soziologische Ursachen - „Bereichsdenken“ .....	84
4.2.1.4	Zusammenfassung .....	86
4.2.2	<i>Kategorisierung geometrischer Abweichungen</i> .....	86
4.2.2.1	Fehl-IST .....	87
4.2.2.2	Fehl-SOLL .....	88
4.2.2.3	Positionsabweichung .....	88
4.2.2.4	Gestaltabweichung .....	89
4.2.2.5	Fazit .....	89
4.3	PROZESSBESCHREIBUNG: SOLL/IST-VERGLEICH MIT AUGMENTED REALITY .....	90
4.3.1	<i>Organisatorische Vorbereitung</i> .....	91
4.3.2	<i>Datenbeschaffung</i> .....	92
4.3.3	<i>Systemkalibrierung</i> .....	94
4.3.3.1	Optische Kamerakalibrierung .....	95
4.3.3.2	Target-Kamera-Kalibrierung .....	96
4.3.4	<i>Registrierung</i> .....	97
4.3.5	<i>Ist-Aufnahme</i> .....	99
4.3.6	<i>Analyse</i> .....	100
4.3.6.1	Visualisierungsfunktionen .....	100
4.3.6.2	Transformationsfunktionen .....	101
4.3.6.3	Vermessungsfunktionen .....	101
4.3.6.4	Zusammenfassung .....	102
4.3.7	<i>Dokumentation</i> .....	103
4.4	ZUSAMMENFASSUNG UND LÖSUNGSSTRATEGIE .....	103
4.4.1	<i>Handlungsbedarf in den Teilprozessen</i> .....	103
4.4.2	<i>Lösungsweg</i> .....	105
<b>5</b>	<b>VERBESSERUNG DES REGISTRIERUNGSPROZESSES</b> .....	<b>107</b>
5.1	AUSWAHL DES TRACKINGSYSTEMS .....	109
5.1.1	<i>Bewertungskriterien</i> .....	109
5.1.2	<i>Bewertung</i> .....	111
5.1.2.1	Markerloses Tracking .....	111
5.1.2.2	Markertracking .....	112
5.1.2.3	Koordinatenmessgeräte .....	113
5.1.3	<i>Auswahl</i> .....	114
5.1.4	<i>Trackingkonfiguration des Unifeye SDK</i> .....	115
5.2	ENTWICKLUNG EINER MARKERBASierten LÖSUNG .....	116
5.2.1	<i>Randbedingungen</i> .....	116
5.2.2	<i>Systemsetup</i> .....	120
5.2.3	<i>Systemkalibrierung</i> .....	122
5.2.3.1	Kalibrierung des optischen Systems (Kamerakalibrierung) .....	122
5.2.3.2	Kalibrierung der Adapter .....	122
5.2.3.3	Intermarkerkalibrierung .....	125
5.2.4	<i>Registrierungsprozess</i> .....	125
5.2.5	<i>Evaluierung im Pilotprojekt</i> .....	128

5.2.5.1	Vorbereitung.....	129
5.2.5.2	Durchführung / Erfassung.....	130
5.2.5.3	Auswertung.....	130
5.2.5.4	Ergebnis.....	131
5.2.6	<i>Fazit</i> .....	132
5.3	ENTWICKLUNG EINES SYSTEMS MIT LARGE AREA LASERTRACKING.....	132
5.3.1	<i>Randbedingungen</i> .....	133
5.3.2	<i>Systemsetup</i> .....	134
5.3.3	<i>Systemkalibrierung</i> .....	135
5.3.4	<i>Registrierungsprozess</i> .....	138
5.3.5	<i>Evaluierung im Pilotprojekt</i> .....	141
5.3.5.1	Vorbereitung.....	141
5.3.5.2	Durchführung .....	143
5.3.5.3	Ergebnis.....	146
5.3.5.4	Fazit.....	148
5.4	ZUSAMMENFASSUNG.....	148
<b>6</b>	<b>UNTERSUCHUNGEN ZUR DATENAUFNAHME UND -AUSWERTUNG .....</b>	<b>151</b>
6.1	AUFBAU DER PROBANDENSTUDIE .....	152
6.1.1	<i>Probandengruppen und Methodik</i> .....	152
6.1.1.1	Gruppe 1: 2D – technische Zeichnungen.....	152
6.1.1.2	Gruppe 2: 3D – CAD Tool .....	152
6.1.1.3	Gruppe 3: Augmented Reality .....	152
6.1.2	<i>Versuchsaufbau</i> .....	153
6.1.3	<i>Abweichungen</i> .....	154
6.2	DATENERHEBUNG .....	156
6.2.1	<i>Parameter und Messdaten</i> .....	156
6.2.2	<i>Erfassen von Befinden und Motivation</i> .....	157
6.2.3	<i>Statistik</i> .....	158
6.3	ARBEITSHYPOTHESEN .....	159
6.4	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....	160
6.4.1	<i>Probanden</i> .....	160
6.4.2	<i>Ablauf</i> .....	160
6.5	ERGEBNISSE .....	161
6.5.1	<i>Erkannte Soll/Ist-Abweichungen</i> .....	161
6.5.1.1	Kategorie 1 – Fehl-IST .....	162
6.5.1.2	Kategorie 2 – Fehl-SOLL .....	162
6.5.1.3	Kategorie 3 – Geometrieabweichung.....	162
6.5.1.4	Kategorie 4 – Positionsabweichung.....	162
6.5.1.5	Zusammenfassung .....	163
6.5.2	<i>Arbeitserfahrung und -strategie</i> .....	163
6.5.2.1	2D – technische Zeichnung.....	164
6.5.2.2	3D – CAD Tool .....	165
6.5.2.3	Augmented Reality .....	167
6.5.3	<i>EZ-Skala</i> .....	169
6.5.3.1	2D – technische Zeichnungen.....	169
6.5.3.2	3D – CAD Tool .....	170
6.5.3.3	Augmented Reality .....	171
6.5.3.4	Zusammenfassung .....	172
6.5.4	<i>AR-spezifische Untersuchungen</i> .....	173
6.5.4.1	Anzahl der Fotos – Abhängigkeiten .....	173
6.5.4.2	Genutzte Funktionen der AR-Software.....	174
6.5.5	<i>Probandenfeedback</i> .....	175
6.5.6	<i>Zusammenfassung</i> .....	177
<b>7</b>	<b>SCHLUSSBETRACHTUNGEN .....</b>	<b>179</b>
7.1	ZUSAMMENFASSUNG .....	179
7.2	ERKENNTNISGEWINN.....	181
7.3	AUSBLICK.....	183
	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>V</b>
	<b>BEGRIFFS- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>XXIX</b>

<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>XXXIII</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>XXXIX</b>
<b>A. ANHANG .....</b>	<b>XLI</b>
A.1    TECHNIKEN DER DIGITALEN FABRIK .....	XLI
A.2    DATENERFASSUNGSBLATT – FOTOBASIERTER AR SOLL/IST-VERGLEICH.....	XLIV
A.3    GESAMTÜBERSICHT ALLER ABWEICHUNGEN.....	XLV
A.4    FRAGEBOGEN ZUR TECHNISCHEN VORERFAHRUNG .....	XLVII
A.5    EZ-SKALA NACH NITSCH.....	XLVIII
A.6    FEEDBACKFRAGEBOGEN ZUR BEURTEILUNG DER HILFSMITTEL .....	XLIX
A.7    VERSUCHSPROTOKOLL ZUM SOLL/IST-VERGLEICH VON KONSTRUKTIONSDATEN.....	L
A.8    BEOBACHTUNGSPROTOKOLLE .....	LI
A.9    FÖRDERVERMERK, STUDENTISCHE ARBEITEN, ERFINDUNGSMELDUNGEN .....	LII
A.10   EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG.....	LIII

# 1 Motivation und Zielsetzung

*„Der schlimmste aller Fehler ist, sich keines solchen bewusst zu sein.“ [Thomas Carlyle]*

## 1.1 Ausgangssituation

Auf internationaler und nationaler Ebene vollziehen sich in der industriellen Produktion und im Dienstleistungsbereich tief greifende Wandlungsprozesse. Globalisierung der Produktion, steigende Marktdynamik und erhöhter Kostendruck zwingen die Industrieunternehmen zur ständigen innovativen Anpassung ihrer Fabrik- und Produktionsstrukturen [SRG09]. Das Ziel einer langfristigen Unternehmenssicherung kann im internationalen Wettbewerb nur erreicht werden, wenn die Anpassung an diese immer schneller wachsenden und sich wandelnden Anforderungen gelingt [Mal00, CGW09]. Insbesondere die zunehmende Volatilität im Kaufverhalten der Kunden sowie eine immer stärkere Nachfrage nach individualisierten Produkten stellen hohe Anforderungen hinsichtlich einer flexiblen und qualitätsgerechten Produktion. Diesen Herausforderungen wird mit einer kontinuierlichen Verbesserung von Effizienz und Flexibilität von Planungs- und Produktionsprozessen begegnet [SMP06, Hir08].

Für produzierende Unternehmen bedeutet dies nicht nur die Optimierung bestehender Fertigungsstrukturen sondern vor allem die Umsetzung neuer Produkte. Hierzu sind der Bau neuer Fabriken sowie die Integration neuer Modelle in bestehende Produktionsstrukturen erforderlich, wodurch ein hoher Planungsaufwand für Neu- und Umplanungen im Sinne der Wiederverwendung von Produktionsmitteln entsteht. Heute werden diese komplexen Planungsaufgaben mit den Werkzeugen und Modellen der Digitalen Fabrik (DF) gelöst. Die DF dient als Grundlage für die gesamte Fabrikplanung, da neben Layout- und Aufbauplan auch sämtliche Fertigungs- und Logistikprozesse der realen Fabrik abgebildet werden [BWG11]. Mit digitalen Werkzeugen werden Abläufe und Prozesse simuliert und somit Stückzahlen, Qualität und Kollisionsfreiheit verifiziert, noch bevor der erste Spatenstich für eine reale Anlage gesetzt ist. Durch diese Vorgehensweise wird die Planungssicherheit erheblich gesteigert. Das vermeidet Planungsfehler und reduziert sowohl Planungskosten und -zeiten [RBK05].

Am Ende des digitalen Fabrikplanungsprozesses stehen jedoch reale Fertigungshallen und Betriebsmittel, welche zum Teil stark von den Modellen der Digitalen Fabrik abweichen [HBD09]. Die Ursachen hierfür liegen sowohl im Planungsprozess, den Planungssystemen als auch dem Bereichsdenken der Beteiligten. Baut nun die weitere Planung auf der digitalen Repräsentation von Planungsdaten auf, wird es unweigerlich zu Fehlern kommen, welche kosten- und zeitintensive Änderungen nach sich ziehen [Kie07, GSB+07, Sch08]. In der Aufwandsabschätzung empfiehlt es sich daher, die vorhandenen Planungsdaten nicht ungeprüft weiter zu verwenden, sondern im Vorfeld Soll/Ist-Vergleiche durchzuführen, um Abweichungen rechtzeitig zu erkennen und ggf. in das digitale Modell zurückzuführen.

Als intuitive Schnittstelle zwischen der realen und digitalen Welt bietet die Augmented Reality (AR) Technologie ein hohes Potenzial, um Fertigungsplanungsprozesse durch Überlagerung realer Objekte mit virtuellen Plandaten zu verbessern. Produktionsanlagen lassen sich schon früh im Planungsprozess vor Ort bewerten. Die Anlagen können beim Aufbau visuell mit den Plandaten verglichen werden, um Abweichungen zu erkennen. Bei Anlagenübergabe ermöglicht AR das Prüfen von Vollständigkeit und Positionierung aller geplanten Teilmodelle. In den vergangenen Jahren entstanden zahlreiche AR-basierte Anwendungen für den industriellen Einsatz [Ale05, FW06, OYN08]. Obwohl diese Anwendungen fast alle Phasen des Produktentstehungsprozesses abdecken (Konzeption, Planung und Produktion, Service und Wartung), konnten sich die meisten nicht über einen Demonstrator- oder Prototypenstatus hinaus zu etablierten Lösungen entwickeln [Reg06, KP10].

### **1.2 Aufgabenstellung - Ziel der Arbeit**

Ein Grund für die bisher nicht stattfindende Integration der AR-Technologie in den Produktionsplanungsprozess ist, dass vorhandene industrielle Prozesse und Randbedingungen bei der Entwicklung von AR-Systemen nicht angemessen berücksichtigt werden [SK97, SKWS07, BTP08]. So entstehen technisch innovative AR-Systeme, die jedoch unnötige Mehrarbeit im Planungsprozess verursachen und so aufgrund mangelnder Anwenderakzeptanz nie einen Platz im produktiven Wertschöpfungsprozess finden. Verursacht wird diese Mehrarbeit beispielsweise durch Prozesse, die bei der Planung bereits durchgeführt werden und im Rahmen eines AR-Einsatzes in ähnlicher Form separat zu wiederholen sind. Für eine dauerhafte Integration in den industriellen Planungsprozess sind daher AR-Anwendungen nötig, welche sich optimal an die zu unterstützenden Produktions- und Planungsprozesse anpassen.

Das Anpassen an die industriellen Rahmenbedingungen erfordert die Beantwortung anwendungsbezogener Fragen zum Prozess der AR-Unterstützung. Dieser Prozess ist derart zu gestalten, dass er einerseits vorhandene Eingangsgrößen aus dem Produktionsplanungsprozess nutzt ohne Mehraufwand zu generieren. Andererseits ist eine AR-Anwendung nur dann wertschöpfend, wenn zum Ende definierte Ergebnisse vorliegen, die im fortlaufenden Produktionsplanungsprozess weiterverwendet werden.

Für die Untersuchung dieser anwendungsbezogenen Fragestellungen ist eine ausführliche Analyse des Zielprozesses „AR-basierte Soll/Ist-Vergleiche von Betriebsmitteln in der Fertigungsplanung“ notwendig. Eine isolierte Betrachtung aus Sicht der Informatik als Domäne der Augmented Reality ist nicht ausreichend. Diese Arbeit schlägt daher eine Brücke zwischen der Informatik und Disziplinen aus Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaft, welche grundlegend für den Produktionsplanungsprozess sind.

Ziel der vorgelegten Dissertation ist es, den Prozess zum Einsatz der Augmented Reality Technologie für Soll/Ist-Vergleiche von Betriebsmitteln in der Fertigungsplanung zu untersuchen, wobei der Schwerpunkt in der Identifikation von Handlungsbedarf zur Prozessverbesserung liegt. Im Ergebnis dieser Untersuchung soll ausgewählter Handlungsbedarf verbessert werden, um den Einsatz der AR-Technologie langfristig besser in den Produktionsplanungsprozess zu integrieren. Die Verbesserung wird evaluiert und anschließend eine Handlungsempfehlung für weiterführende Untersuchungen oder ein Konzept zur endgültigen Prozessintegration gegeben.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit wird durch eine konkrete Problemstellung aus dem produktionsplanerischen Tagesgeschäft motiviert und hat daher einen starken Praxisbezug. Im Kontext der Forschungsthemen zur Augmented Reality ordnet sie sich in den Bereich der anwendungsorientierten Forschung ein. Unter diesen Rahmenbedingungen eignet sich zur Bearbeitung des Themas das Vorgehensmodell nach Ulrich zur angewandten Wissenschaft im Theorie- und Praxisbezug als Referenzmodell für den Aufbau der vorliegenden Arbeit [Ulr84]. Das Referenzmodell wird in Abbildung 1-1 dargestellt.

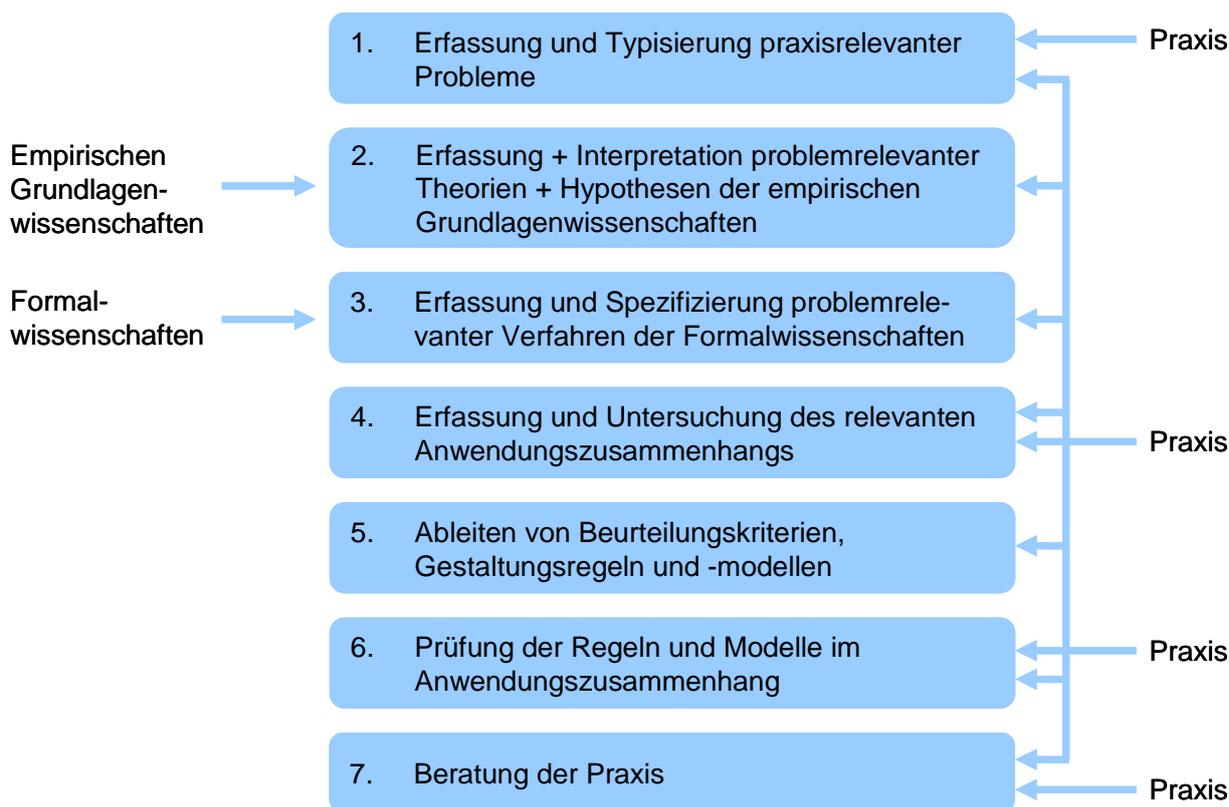


Abbildung 1-1: Angewandte Wissenschaft in Theorie- und Praxisbezug nach [Ulr84]

Nach Ulrich beginnt der Forschungsprozess in der Praxis, ist zur Hauptsache auf die Untersuchung des Anwendungszusammenhangs gerichtet und endet in der Praxis. Die theoretischen Grundlagen übernehmen dabei die Funktion der „Informationslieferanten“ [Ulr84], wobei nicht eine einzelne Grundlagenwissenschaft, sondern die Auswertung des Wissens zahlreicher Disziplinen notwendig ist, um die komplexen und mehrdimensionalen Phänomene praxisrelevanter Probleme zu erfassen. Notwendigerweise ist der untersuchte technische Sachverhalt dabei nicht abgegrenzt zu betrachten, sondern auch die Wechselwirkungen mit den größeren sozialen und natürlichen Zusammenhängen wissenschaftlich zu analysieren [Cla09].

Wesentlich für Ulrichs Modell ist, dass die Phasen 1, 4, 6 und 7 gemäß Abbildung 1-1, in denen der Praxiszusammenhang aktiv im Forschungsprozess in Erscheinung tritt, als wissenschaftliche Hauptaufgaben anerkannt und nicht als Nebenaufgaben eigentlich nicht wissenschaftlicher Arbeit an die Praxis abgeschoben werden. Ziel des Forschungsprozesses sind nicht allein rationale Erklärungsmodelle, sondern Erkenntnisse, die als „Verstehensmodelle“ bezeichnet werden können. Wie in der Grafik zu erkennen ist, hat der Prozess angewandter Forschung einen iterativen Charakter, so dass Phase 7 keineswegs als zeitlicher Schlusspunkt sondern wie alle anderen Phasen auch als ständig wiederkehrender Prozess gesehen werden kann. Jede Iteration dient der Erweiterung des aktuellen Kenntnisstandes.

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Iteration des beschriebenen Vorgehensmodells und ist in Anlehnung an dasselbe in sieben Kapitel gegliedert (vgl. Abbildung 1-2).

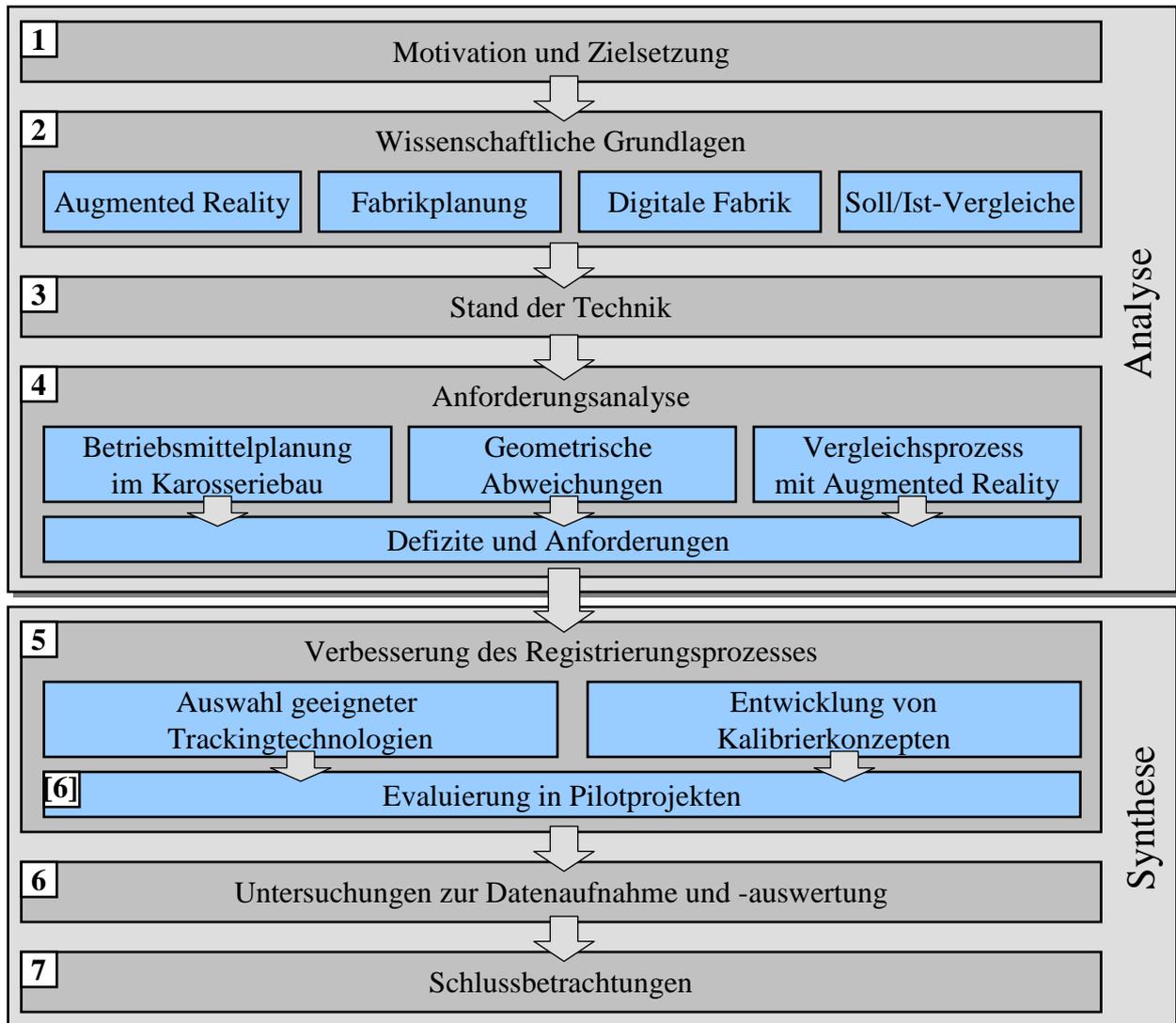


Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit [eigener Entwurf]

**Motivation und Zielsetzung** - Kapitel eins leitet die Arbeit mit einer aus der Praxis motivierten Problemstellung ein und skizziert den Problemlösungsprozess anhand Ulrichs Referenzmodell für anwendungsorientierte Forschung.

**Wissenschaftliche Grundlagen** - Kapitel zwei behandelt die zum Verständnis der Arbeit notwendigen, interdisziplinären wissenschaftlichen Grundlagen der Arbeit. Neben der Augmented Reality wird Basiswissen zur Digitalen Fabrik, zur Produktionsplanung und zur Messtechnik zusammengefasst.

**Stand der Technik** - Im dritten Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik im Kontext des Anwendungszusammenhangs zum Soll/Ist-Vergleich untersucht und offener Handlungsbedarf abgeleitet.

**Anforderungsanalyse** - Kapitel vier beschreibt die Untersuchung des konkreten Anwendungsfalls. Zunächst wird der Fertigungsplanungsprozess im Karosserie-rohbau analysiert, um wesentliche Eigenschaften von Betriebsmitteln als Vergleichsgegenstand kennen zu lernen und Abweichungsursachen zu identifizieren. Existierende Abweichungen werden definiert und kategorisiert. Der Schwerpunkt des Kapitels liegt auf der Analyse des Vergleichsprozesses mit AR. Dabei werden Teilprozesse mit hohem Handlungsbedarf identifiziert und abschließend als Themenschwerpunkt der Arbeit definiert.

**Verbesserung des Registrierungsprozesses** - Kapitel fünf dokumentiert die Verbesserung des Registrierungsprozesses. Einleitend wird der Begriff der Registrierung im Anwendungskontext erläutert. Auf Basis ausgewählter Kriterien findet eine Bewertung und Auswahl geeigneter Trackingtechnologien statt. Die Integration der ausgewählten Technologien in ein AR-System erfordert die Entwicklung spezifischer Kalibrierkonzepte. Im Ergebnis liegen kalibrierte AR-Systeme vor, die eine schnelle und präzise Registrierung im Anwendungsumfeld ermöglichen. Obgleich sich System- und Prozessevaluierung in die sechste Phase des anwendungsorientierten Forschungsmodells nach Ulrich einordnen lassen, bildet die Prüfung der entwickelten Konzepte im Rahmen von Pilotprojekten jeweils den Abschluss der Systementwicklung in Kapitel fünf.

**Untersuchungen zur Datenaufnahme und -auswertung** - Das sechste Kapitel beschreibt eine Probandenstudie zur Untersuchung der Teilprozesse der Datenaufnahme und Szenenauswertung, sowie zur Prüfung von Potenzial und Nutzerbelastung der AR-Technologie. Nach Versuchsdurchführung werden die Vergleichsergebnisse gegenübergestellt und diskutiert.

**Schlussbetrachtungen** - In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst, der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn diskutiert sowie ein Ausblick auf zukünftig geplante Arbeiten präsentiert.

Abschließend enthält die Arbeit Verzeichnisse zu Literatur, Abkürzungen, Abbildungen, Tabellen, sowie einen Anhang mit den im Rahmen dieser Promotion verwendeten Formularen zur Datenerhebung.

## 2 Wissenschaftliche Grundlagen

Im Rahmen dieser Dissertation werden Konzepte zur Realisierung von Augmented Reality basierten Soll/Ist-Vergleichen erarbeitet. Der interdisziplinäre Hintergrund dieses Themas erfordert die Aufbereitung der wesentlichen Grundlagen der einzelnen Themenbereiche. Im Folgenden findet sich entsprechendes Basiswissen zu:

- Augmented Reality, als angewendete Kerntechnologie,
- Fabrik- und Produktionsplanung, sowie
- der Digitalen Fabrik als Arbeitsumfeld,
- Soll/Ist-Vergleichen als Anwendungsfall mit einem Fokus auf Messtechnik, als Integrator zwischen digitaler und realer Fabrik.

### 2.1 Augmented Reality

Mit Begriffen wie „Outernet“ oder „Internet der Dinge“ bezeichnen Trendforscher heute die fortschreitende Verschmelzung von physischer und virtueller Welt auf Basis des Ubiquitous Computing [Wei91, FRG+10]. Kerntechnologie hierfür ist die *Augmented Reality*, welche diesen Trend in Verbindung mit mobilen Endgeräten immer weiter vorantreibt [Reh11].

#### 2.1.1 Definition

Die beiden in der Literatur am häufigsten verwendeten Definitionen von Augmented Reality stammen von Milgram [MK94] und Azuma [Azu97]. Milgram bezieht sich auf die Analogie von Erweiterter und Virtueller Realität (VR), um das Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum zu definieren. Innerhalb des Kontinuums findet AR als Teilbereich der Gemischten Realität (Mixed Reality, MR) einen Platz zwischen der Realität und der Virtualität (Abbildung 2-1). Im Gegensatz zur Erweiterten Virtualität (Augmented Virtuality, AV), orientiert sich AR stärker an der realen als an der virtuellen Welt. Dies verdeutlicht den Charakter der Erweiterung der vom Nutzer wahrgenommenen Realität.

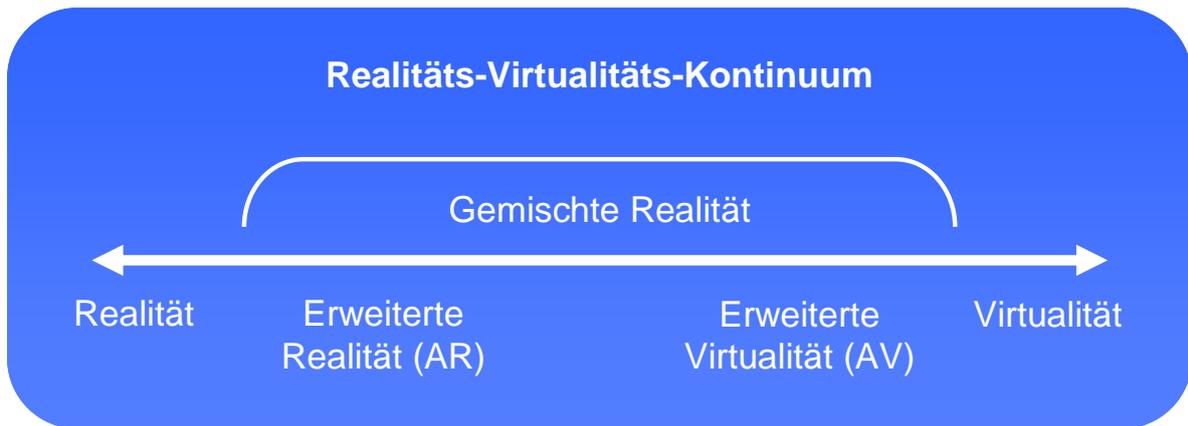


Abbildung 2-1: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum nach Milgram et al. [MK94]

Die im AR-Survey von Azuma vorgestellte Definition von AR besitzt einen sehr technischen Charakter. Unabhängig von der verwendeten Technologie kennzeichnet sie AR-Systeme durch die drei folgenden Eigenschaften:

- Kombination von Realität und Virtualität
- Interaktion in Echtzeit
- Registrierung realer und virtueller Objekte im 3D-Raum

In den gängigen Definitionen von AR wird bezüglich der Erweiterung der Wahrnehmung der Anwender keine Einschränkung hinsichtlich der Sinnesmodalitäten vorgenommen. Somit sind Erweiterungen von akustischer, visueller, taktile, olfaktorischer oder gustatorischer Sinneswahrnehmung möglich. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Erweiterung der visuellen Wahrnehmung.

### 2.1.2 Technologien und Systemarchitektur

AR-Systeme sind nach dem klassischen *EVA*<sup>1</sup>-Prinzip aufgebaut. Eingabe-, Verarbeitungs- und Ausgabesystem werden durch unterschiedliche Technologien realisiert. Zur Registrierung von realen und virtuellen Objekten im 3D-Raum ist ein Trackingsystem notwendig. Displaysysteme visualisieren das Überlagerungsergebnis im Sichtfeld des Anwenders. Die Kommunikation zwischen den Systemkomponenten erfordert eine Systemarchitektur, die Schnittstellen für alle beteiligten Systeme zur Verfügung stellt. Der folgende Abschnitt erläutert gängige Tracking- und Displaytechnologien und stellt eine Referenzarchitektur für AR-Systeme vor.

---

<sup>1</sup>EVA = Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe

### 2.1.2.1 Tracking Technologien

#### Überblick

Trackingsysteme ermöglichen die Lage- und Positionsbestimmung von Objekten in der Realität. Sie erfassen die Position und/oder die Orientierung von Anwendern und realen Objekten. Je nach Anwendungsfall wurden in den letzten Jahren zahlreiche Systeme entwickelt, die unterschiedliche Technologie nutzen. Roland et al. unterteilen die Trackingverfahren nach den ihnen zugrunde liegenden physikalischen Wirkprinzipien [RDB00]:

- Time of flight (*TOF*) Systeme basieren auf der Annahme, dass sich ein Signal im Raum mit einer konstanten Geschwindigkeit ausbreitet. Über die Laufzeit eines pulsartig ausgesendeten Signals wird die Entfernung zwischen Sender und Empfänger bestimmt. Die Sender (Emitter) sind an dem zu trackenden Objekt befestigt. Die Empfänger (Receiver) sind an einem Referenzobjekt befestigt, dessen Position im Raum bekannt ist. Um alle sechs Freiheitsgrade (3 rotatorische und 3 translatorische) zu berechnen sind mindestens drei Emitter und drei Receiver erforderlich. Aus den ermittelten Abstandsmaßen zwischen Sendern und Emittlern lässt sich die Position und Orientierung berechnen. Bekannte *TOF* Systeme sind GPS, Ultraschallsysteme und optische Gyroskope.
- Optische (Spatial Scan) Trackingsysteme nutzen 2D-Projektionen von Bildfeatures oder Strahlenbündeln, um Position und Orientierung eines Objektes (Targets) zu bestimmen. Dabei wird zwischen Outside-In (Fixierte Sensorik überwacht ein bewegliches Objekt mit bekanntem Targets/Features) und Inside-Out (Sensoren am Objekt, Targtes/Features sind an Referenzobjekt fixiert) unterschieden. [Mul94] klassifiziert weiterhin das Inside-In Tracking, bei dem Sensoren und Emitter am beweglichen Objekt angebracht sind und auch relative Trackinginformationen ermittelt werden.
- Auf dem Prinzip der Trägheit basierende Trackingsysteme werden auch als Inertiale Trackingsystem bezeichnet und nutzen beispielsweise Drehwinkelsensoren, um die Drehbeschleunigung einer rotierenden Masse zu ermitteln. Möglich sind auch Beschleunigungsaufnehmer, die bei Massenbewegung Trägheitskräfte messen.
- Mechanische Trackingsysteme bedürfen einer permanenten Verbindung zwischen den zu trackenden Objekten und dem Messsystem, welche über Gelenke mit Drehwinkelsensoren und Verbindungsstücken definierter Länge hergestellt wird.

- Trackingsysteme welche auf der Messung von Phasenverschiebung basieren sind ähnlich wie *TOF*-Systeme aufgebaut. Sie bestehen aus mindestens 3 Sende- und Empfangseinheiten. Die Sender emittieren ein konstantes Signal, welches von jedem Empfänger aufgenommen und mit einem Referenzsignal verglichen wird. Die Phasenverschiebung zwischen empfangenem Signal und dem Referenzsignal gibt dann Auskunft über die relative Bewegung zum letzten Messpunkt. Durch die kontinuierliche Messung der Phase sind hierbei größere Datenraten erreichbar, als bei *TOF*-Systemen.
- Die direkte Feldanalyse nutzt Magnet- oder Gravitationsfelder als Grundlage für die Positionsbestimmung (z.B. bei einem Kompass).
- Werden zwei oder mehr Trackingsensoren kombiniert entstehen hybride Trackingsysteme, mit denen sich vorhandene Schwächen einzelner Systeme ausgleichen lassen.

Bei der Auswahl eines geeigneten Trackingsystems sind in jedem Fall die individuellen Randbedingungen der geplanten Anwendung oder der Einsatzumgebung zu beachten. Die einzelnen Bewertungskriterien wie Trackingvolumen, Genauigkeit, Robustheit oder Usability besitzen je nach Anwendungsfall unterschiedlich starke Gewichtungen. Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Trackingsysteme optisches Markertracking, mechanisches Tracking und Lasertracking werden im Folgenden detailliert vorgestellt.

### **Optische Trackingverfahren**

Optische Trackingverfahren können in markerbasierte und markerlose Methoden unterteilt werden [RDB00]. Markerbasiertes Tracking ist in der Literatur auch als Markertracking oder Mustererkennung bekannt. Ein Muster (vgl. Abbildung 2-2) ist eine bekannte Anordnung geometrischer Features, welche von einer Kamera erfasst werden. Auf Basis des im Bild aufgezeichneten 2D-Musters und der bekannten 3D-Musterinformation lassen sich Position und Orientierung des Musters und damit des Targets bezüglich der Kameraposition berechnen. Abbildung 2-2 zeigt einen optischen Marker der Fa. Metaio [met09], dessen Features durch die acht Eckpunkte der schwarzen Umrandungsmarkierung definiert sind. Diese Punkte sind im 3D-Koordinatensystem des Markers bekannt. Bildverarbeitungsalgorithmen ermöglichen die Bestimmung der korrespondierenden Featurepunkte im 2D-Bild. Sind die inneren Kameraparameter<sup>2</sup> bekannt, so lässt sich mit den korrespondierenden 2D-3D Featurepunkten die Kamerapose ermitteln.

---

<sup>2</sup> Kameraspezifische (intrinsische) Parameter wie Brennweite, Hauptpunktlage und optische Verzeichnung.

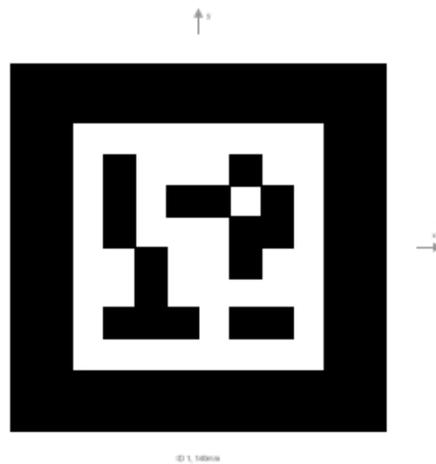


Abbildung 2-2: Beispielmarker [met09]

Klassische Markertrackingmethoden, ermöglichen das Bestimmen der Kamerapose in einem bestimmten Volumen durch den Aufbau eines zueinander kalibrierten Multi-Marker-Verbundes [KB99, Wag07]. Mit zunehmendem Trackingvolumen steigen auch die benötigte Markeranzahl und der Kalibrieraufwand.

Markerlose Trackingmethoden, wie z.B. SIFT [Low99] oder SURF [BTG06] verwenden natürliche Umgebungsfeatures, die im Kamerabild erkannt werden und als natürliche Marker fungieren. Oft sind jedoch bekannte Markermuster notwendig, die als „Stützstellen“ in Bildbereichen mit wenigen Features benötigt werden oder zur Registrierung der Szene in der realen Umgebung notwendig sind [KS07].

Im Gebiet der Robotik wird in den letzten Jahren die Entwicklung markerloser Trackingverfahren auf Basis von SLAM-Algorithmen vorangetrieben [DWB06]. Motiviert wird dies durch das Bestreben, dass ein Roboter selbstständig eine Karte der Umgebung erlernt und zur Lokalisierung verwendet. [MFA09] gibt einen Überblick über optische SLAM Ansätze. Ein Beispiel für kleine Arbeitsbereiche liefern Klein und Murray [KM07]. Sie nutzen Monokamera-SLAM um natürliche Features zu erkennen, die gleichzeitig getrackt und kartiert werden. Durch die Verwendung mehrerer Karten kann dieses Verfahren auch für den Einsatz in größeren Umgebungen erweitert werden [CKM08].

### **Mechanische Trackingverfahren**

Mechanische Trackingsysteme bedingen eine permanente Verbindung zwischen den zu trackenden Objekten und dem Messsystem, welche über Verbindungsstücke definierter Länge und Gelenke mit Drehwinkelsensoren hergestellt wird. Die Gesamttransformation des Koordinatensystems vom zu trackenden Objekt ergibt sich aus der kumulierten Transformation aller, an der mechanischen Verbindung beteiligten Einzelelemente. Mechanische

Trackingsysteme sind in den meisten Fällen 6-DOF<sup>3</sup> Systeme, wobei die Bewegungsfreiheit eingeschränkt und das Trackingvolumen durch Gelenke und Abmessungen der Verbindungselemente limitiert ist. Abbildung 2-3 zeigt einen Messarm der Fa. FARO, welcher als zertifiziertes Koordinatenmessgerät (KMG) ein schnelles Einmessen in beliebige Koordinatensysteme ermöglicht. Es ist möglich einem Benutzer ein haptisches Feedback zu geben, um die Interaktion mit einer virtuellen Umgebung zu verbessern. Ein wesentlicher Vorteil dieser Systeme ist die hohe Genauigkeit bei der Positionsbestimmung.



Abbildung 2-3: FARO Platinum Messarm, Mechanisches Trackingsystem [FAR09]

### Lasertracking

Lasertracker sind hochgenaue Messgeräte, die durch Kombination aus Winkelmessung und Laser-Distanzmessung die 3D-Punktkoordinaten eines Objekts erfassen. Sie verfügen über zwei Teilkreise und (mindestens) eine elektrooptische Entfernungsmesseinrichtung. Eine automatische Zieleinrichtung gewährleistet, dass der Messkopf der Richtung eines sich bewegenden Reflektors folgt und diese kontinuierlich erfasst. Zur Distanzmessung wird das Verfahren der Interferometrie<sup>4</sup> eingesetzt [Dem07].

---

<sup>3</sup> DOF = Degrees Of Freedom; dt. Freiheitsgrade (im kartesischen Raum: 3 translatorische und 3 rotatorische)

<sup>4</sup> Interferometrie nutzt entweder nur die Laufzeit oder Laufzeit und Phasenverschiebung eines ausgesandten und im Zielpunkt reflektierten Lichtstrahls zur Entfernungsmessung. Das Licht der Trägerwelle liegt im infraroten Bereich oder im nahen Infrarot des Lichtspektrums. Die Reflexion des Lichtstrahls im Zielpunkt erfolgt in einem angezielten, retroreflektierenden Tripel-Prisma (Tripel-Spiegel) mit einer Reichweite von bis zu 10 Kilometer.

Der aus dem Interferometer austretende Messstrahl wird mit Hilfe eines um zwei Achsen drehbaren Spiegels auf den Reflektor gerichtet. Der reflektierte Strahl wird zu einem Teil auf einen positionsempfindlichen Detektor (PSD) gelenkt, zum anderen Teil zur Streckenmessung in die Interferometereinheit. Die dabei auftretenden Bewegungen der Spiegel werden von den Winkelencodern fortlaufend erfasst. Bei einer Bewegung des Reflektors entsteht ein paralleler Versatz zwischen gesendetem und reflektiertem Strahl, der auf dem PSD als zweidimensionale Ablage detektiert wird. Diese Größe findet Eingang in einen Regelkreis mit dem Ziel, die Ablagen dauerhaft zu minimieren [Jur07].

Lasertracker zeichnen sich vor allem durch ihre große Reichweite bei gleichzeitig hohen Genauigkeiten aus. Obgleich sie heute in der industriellen Messtechnik nicht mehr wegzudenken sind, finden sie aufgrund der hohen Investitionskosten im Bereich der Augmented Reality bisher kaum Anwendung. Aktuell gibt es drei Hersteller von Laser-Trackern: Die Unternehmen Automated Precision (API), Leica Geosystems und Faro [Kyl05]. Die Investitionskosten liegen zwischen 100.000 € und 200.000 € [Ose08]. Der im Handel erhältliche Lasertracker Laser Tracker X der Fa. Faro ist in Abbildung 2-4 dargestellt.



Abbildung 2-4: FARO Lasertracker [FAR09]

Seit 2006 etablieren sich im Bereich der Lasertracker zunehmend aktive Taster, die neben einer Koordinate im Raum auch einen Vektor messen können. API und Leica bieten des Weiteren auch aktive Targets zur Bestimmung der 6-DOF eines Objektes im Raum (STS von API oder T-Mac von Leica) an. Hierbei werden nicht nur die Positionskoordinaten (X, Y, Z) im Raum sondern auch die Orientierung des Targets gemessen.

### 2.1.2.2 Visualisierungstechniken

Es existieren zahlreiche Möglichkeiten zur Visualisierung von Augmented Reality Inhalten. Verfügbare Anzeigegeräte unterscheiden sich in Aspekten wie der Größe und dem vom Anwender wahrgenommenen Grad der Immersion. In der Literatur finden sich zahlreiche Klassifizierungen zu Anzeigegeräten für VR-Anwendungen im Allgemeinen und AR-Anwendungen im Speziellen. Die nachfolgende Aufstellung von Anzeigegeräten basiert auf den Recherchen und Displayklassifizierungen von Milgram et al. [MK94], Bimber und Raskar [BR05] und Bowman et al. [BKLP04]. Die von Milgram vorgestellte Taxonomie für Mixed Reality Displays unterstützt die Auswahl von geeigneten Anzeigegeräten auf Basis von ausgewählten technologischen Anforderungen an AR-Displays. Bimber und Raskar nutzen zur Klassifizierung der Anzeigegeräte deren konkrete Position in Bezug auf den Anwender und arbeiten in ihrer Recherche Vor- und Nachteile der einzelnen Klassen heraus. Bowman et al. präsentieren einen generellen Überblick über visuelle Ausgabegeräte mit Fokus auf 3D-Nutzerschnittstellen. Die folgenden Ausführungen zum aktuellen Stand der Technik basieren auf der von Bimber et al. vorgestellten Klassifizierung.

#### Kopfgetragene Geräte

Die Klasse der kopfgetragenen Geräte (engl. Head mounted displays, HMD) beinhaltet alle Anzeigegeräte die vom Anwender direkt am Kopf getragen werden. Es werden drei wesentlichen Typen unterschieden:

- *Video See-Through (VST)* HMDs nutzen einen oder zwei Bildschirme (z.B. *CRT*, *LCD* oder *OLED*), welche in einem Helm oder in Brillen vor den Augen des Anwenders montiert sind. Eine am Nutzer oder am Display angebrachte Videokamera nimmt das Bild der Umgebung auf. Dieses wird durch einen Computer verarbeitet um daraus ein neues, durch zusätzliche virtuelle Einblendungen angereichertes Bild zu generieren, welches dann über die Monitore visualisiert wird. Das Sichtfeld des Anwenders auf die reale Welt entspricht dem Sichtfeld der Kamera und ist durch die Eigenschaften von Kamera und Display sowie durch die Positionierung der Kamera beschränkt. Dies führt bei einer Live-Visualisierung im Allgemeinen zur Beeinträchtigung der Hand-Augen-Koordination des Anwenders [BR98]. Ein Beispiel für VST-HMDs ist das Nikon Emagin Z800 3D Visor [Ema08].



Abbildung 2-5: Emagin Visor HMD [Ema08]

- *Optical See-Through* (OST) HMDs ermöglichen es dem Anwender die reale Umgebung wie gewohnt wahrzunehmen. Dem Nutzer eines OST-HMDs werden ausschließlich die zusätzlichen virtuellen Elemente über einen halb transparenten Spiegel eingeblendet, welcher die Darstellung eines Monitors oder einen Laserstrahl (Retinal Scanning Display) in das Auge des Anwenders reflektiert. Dadurch ermöglicht OST einen sehr hohen Grad der Immersion („Eintauchen des Nutzers“). Der augmentierbare Bereich entspricht dem Sichtfeld des HMDs. Durch diese Art der Visualisierungstechnik ergeben sich zusätzliche Herausforderungen, welche die lagerichtige Verknüpfung der virtuellen Einblendung mit der realen Welt betreffen [Tüm09].
- *Projection See-Through* (PST) ist eine vergleichsweise neue Visualisierungstechnik. Die Sicht auf die Umwelt wird dem Anwender wie bei OST gewährt, jedoch projiziert das HMD nicht direkt ins Auge, sondern auf Objekte der realen Umgebung. Der augmentierbare Bereich entspricht dem Projektionsbereich (Reichweite, Öffnungswinkel) des Monitors / Projektors. Hier ergeben sich Herausforderungen dahin gehend, dass stets nahe stehende, Licht reflektierende, jedoch nicht spiegelnde Objekte verfügbar sein müssen, auf die projiziert werden kann [HGB+01]. Verschiedene Oberflächentexturen erschweren das Erkennen des projizierten Bildes.

### **Hand-Held Devices**

Zur Gruppe der handgehaltenen Anzeigeräte werden Displaysysteme gezählt, die der Anwender in seiner Hand tragen und bei Bedarf im Sichtfeld positionieren kann. Beispiele hierfür sind Tablet-PCs, PDAs, Mobiltelefone und UMPCs. Diese Geräte setzen in der Regel das Konzept einer Video-See-Through Visualisierung um, wobei Bilder einer am Display fest angebrachten Kamera für die Darstellung der AR-Inhalte genutzt werden.

Aus der Literatur sind ebenfalls handheld Konzepte bekannt, die von der Umsetzung als VST-System abweichen. So existieren Systeme, die sowohl optische Durchsicht [SCHB01], als auch projektorbasierte Visualisierung umsetzen [RBB+03].



Abbildung 2-6: mobile AR-Anwendung auf einem PDA [SW07]

### Stationäre Anzeigeräte

Der dritten und letzten Gruppe unabhängiger bzw. stationärer Anzeigeräte werden alle Geräte zugeordnet, die nicht direkt vom Nutzer getragen werden. Die Visualisierung kann hierbei ebenfalls auf verschiedene Arten realisiert werden:

- Video Durchsicht- (VST) Systeme lassen sich mit einfachen Bildschirmen umsetzen, so dass die augmentierte Szene beispielsweise auf einem Standard Desktop-Monitor angezeigt wird.
- Optische Durchsicht- (OST) Systeme lassen sich durch eine definierte räumliche Anordnung optischer Displays realisieren. Beispiele hierfür sind transparente Bildschirme oder holografische Displays [BR05].
- Projektorbasierte Systeme visualisieren virtuelle Informationen direkt auf der Oberfläche physikalischer Objekte in der realen Umgebung [JMS11].

Jede vorgestellte Visualisierungstechnik bietet bestimmte Vor- und Nachteile. Bei der Auswahl eines Systems für eine spezielle Anwendung sollten deren individuelle Anforderungen berücksichtigt werden. Wesentliche Bewertungskriterien dabei sind [Pen08]:

- Generelle Kriterien wie Größe, Gewicht und Kosten
- spezifische Einsatzanforderungen wie Mehrbenutzerfähigkeit oder Außeneinsatz
- gewünschte Bildqualität hinsichtlich Auflösung, Helligkeit, Sichtbereich
- Grad, der vom Anzeigerät vermittelten Immersion

### 2.1.2.3 Visualisierungsarten

Während Visualisierungstechniken die Technologie der Anzeigegeräte darstellen, beschreibt die Visualisierungsart einerseits die semantische Beziehung des virtuellen Anteils der AR-Szene zur Realität und andererseits die topologischen Beziehungen zwischen dem Anzeigegerät, dem Nutzer (Auge) und der visualisierten AR-Szene (Tracking). Die Darstellung von AR-Inhalten kann mit mehr oder weniger starkem Bezug der virtuellen Informationen zur realen Welt erfolgen. Hierbei wird zwischen kontextabhängiger und kontextunabhängiger Visualisierung unterschieden.



Abbildung 2-7: Visualisierungsarten von AR-Informationen nach [Alt02]

Stehen die virtuellen Informationen in keinem direkten Bezug zu der realen Umgebung, wird von kontextunabhängiger Visualisierung gesprochen. Darunter kann beispielsweise das Einblenden von statischen Texten (z.B. Emails) in das Sichtfeld des Nutzers verstanden werden. Nach Tümler wird die kontextunabhängige AR, die sich auf die visuelle Wahrnehmung beschränkt, oft auch als Augmented Vision bezeichnet [Tüm06].

Im Gegensatz dazu haben die bei der kontextabhängigen Visualisierung dargereichten AR-Informationen einen direkten Bezug zur Umgebung des Nutzers. Bei der nicht-kongruenten Überlagerung wird die Position der eingeblendeten Objekte nicht mit der realen Szene synchronisiert, wobei die Visualisierung dennoch durch die Position und/oder Orientierung des Anwenders im AR-Raum ausgelöst wird. Die konkrete Position des virtuellen Objekts im Sichtfeld hat dabei keine Bedeutung.

Die für die AR bedeutsamste Visualisierungsart ist die kongruente Überlagerung, bei der die angezeigten Informationen mit Objekten der realen Welt verknüpft sind, so dass sich virtuelle Objekte lagesynchron und perspektivisch korrekt in die reale Szene einordnen. Es entsteht der Eindruck, dass es sich um reale Objekte handelt, was zu einem besonders hohen Grad an Immersion führt.

Die kontextabhängige kongruente Überlagerung stellt die größten Herausforderungen an Hard- und Software eines AR-Systems. Die Ursache hierfür liegt in der unterschiedlich starken Ausprägung von Sinneswahrnehmungen. Der Mensch wird durch visuelle Reize stärker beeinflusst als durch akustische oder haptische. Dieses Phänomen ist in der Literatur als „Visual Capture“ bekannt [Azu97]. Durch den permanenten Bezug zur Realität nehmen Anwender von AR-Anwendungen Registrierungsabweichungen stärker wahr als VR-Anwender.

### 2.1.2.4 Komponenten eines AR-Systems

Um ein allgemeines Referenzmodell für AR-Softwarearchitekturen zu erstellen, analysierten Reicher et al. über 18 zum Teil prototypische AR-Systeme [RMBK03]. Dabei identifizierten sie sechs Systemkomponenten, die in fast allen untersuchten AR-Systemen vorhanden waren. Auf dieser Basis wurde die in Abbildung 2-8 dargestellte Referenzarchitektur für AR-Systeme entwickelt.

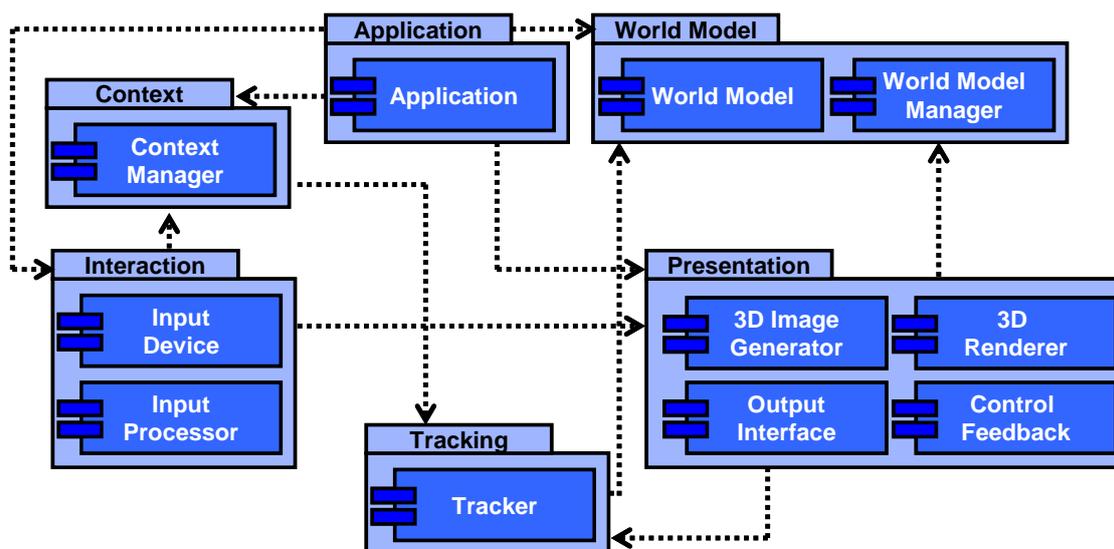


Abbildung 2-8: Referenzarchitektur für AR-Systeme nach [RMBK03]

Die sechs wesentlichen Komponenten eines AR-Systems sind:

- **Application:** Enthält Anwendungslogik und -inhalte und steuert Zugriff auf Clients oder Datenbanken.
- **Tracking:** Ermittelt Position und Orientierung von Anwendern und Objekten.
- **Interaction:** Registriert und verarbeitet Nutzereingaben.
- **Presentation:** Generiert und präsentiert die AR-Szene durch 3D-Visualisierung und ggf. weitere Ausgabegeräte.

- Context: Sammelt kontextbezogene Daten und stellt diese anderen Subsystemen zur Verfügung.
- World Model: Enthält Informationen über reale und virtuelle Objekte im Nutzerumfeld und stellt diese zur Verfügung.

Je nach Anwendung unterscheiden sich die Komponenten eines AR-Systems hinsichtlich ihrer technologischen Realisierung und ihres Funktionsumfangs. Das in dieser Arbeit verwendete System wird im Detail in Kapitel 3.2.4 beschrieben.

### **2.1.3 Anwendungen**

Die Kombination virtueller Informationen mit der realen Umgebung ist in vielen Szenarien sinnvoll. Im Jahr 1995 identifiziert Azuma in einem Bestandspapier zur Augmented Reality sechs Kategorien von AR-Anwendungen: Medizin, Produktion und Service, Annotation und Visualisierung, Roboterprogrammierung, Militärische Luftfahrt und Entertainment [Azu97]. In der Forschungslandschaft der letzten Jahre existieren zahlreiche Veröffentlichungen zu diesen und auch weiteren Anwendungsfeldern. Dennoch sind kommerzielle verfügbare AR-Anwendungen, vor allem für den industriellen Einsatz eher selten [KP10]. Einige Anwendungsbereiche der AR-Technologie werden im Folgenden mit ausgewählten Beispielen präsentiert.

#### **2.1.3.1 Entertainment**

Sowohl TV- und Filmindustrie als auch die Spieleindustrie sind treibende Kräfte im Bereich der AR-Entwicklung. BBC Research untersuchte das Potenzial von Augmented Reality zur Aufwertung von Liveübertragungen und Multimediatelevisiionsproduktionen [LW03]. Beispielanwendungen finden sich bei der Erweiterung von Sportübertragungen durch virtuelle Elemente [NRC09] oder die Visualisierung virtueller Komponenten bei Filmproduktionen direkt am Drehort, wobei Tracking-Daten über die Kamera genutzt werden, um den aktuellen Blick auf die virtuelle Welt zu generieren [Tho07].

In der Computerspieleindustrie ist eine Zunahme der Anzahl von AR-Spielen zu erkennen, da sich mit der Technologie neue Möglichkeiten zur Nutzerinteraktion eröffnen. Die dabei entstandenen Spiele decken vielseitige Genres ab, so dass sich Beispiele für Indoor-, Outdoor-, Single- und Multiplayeranwendungen aufzählen lassen. Eines der bekanntesten Multi-User-Spiele aus der Forschungslandschaft ist der „Invisible Train“ [Wag07], bei dem mit zwei PDAs zwei virtuelle Züge gleichzeitig gesteuert werden können. Mit Rohs

„Impera Visco“ erschien 2006 rundenbasiertes AR-Brettspiel, das durch den Einsatz von optischen Markern ein AR-Gerät ins Spiel einbindet [Roh07]. ARQuake ist ein auf dem PC-Spiel Quake basierender Outdoorshooter [Tho03]. Siemens hat 2006 mit dem Spiel „kickreal“ ein AR-Game auf dem Markt gebracht, bei dem der Nutzer mit seinem von der Handykamera aufgenommenen Fuß an einem virtuellen Elfmeterschießen teilnehmen kann [LR05]. Abbildung 2-9 zeigt die genannten Beispiele für AR-Anwendungen aus dem Bereich Entertainment.



Abbildung 2-9: Beispiele für AR im Entertainment. Oben: virtuelle Ergänzung bei Sportübertragung [NRC09], Unten links: ARQuake [Tho03], Unten rechts: Handygame „kickreal“ [LR05]

### 2.1.3.2 Edutainment

Das Potenzial von Augmented Reality zur spielerischen Vermittlung von Wissen mit schnellem Lerneffekt zeigt sich vor allem in der Vielzahl von „Tour Guide“-Anwendungen der letzten Jahre. Neben dem Projekt ARCHEOGUIDE [VKT+01], einem System, um die antiken Stätten Griechenlands zu erkunden, existieren zahlreiche ähnliche Museumsprojekte für mobile Systeme [BLB03, TN03, Wag07]. In [Ada04] wird Augmented Reality aufgrund der Potenziale im Bereich Edutainment als eine der zehn Top-Technologien der nächsten Jahre klassifiziert.

Eine weit entwickelte AR-Anwendung für den schulischen und universitären Geometrieunterricht ist mit Construct3D seit 2004 verfügbar [Kau04]. Construct3D ist ein mehrbenutzerfähiges System zur Konstruktion dreidimensionaler dynamischer Geometrie, welches die natürliche Zusammenarbeit zwischen Lehrenden und Lernenden ermöglicht.

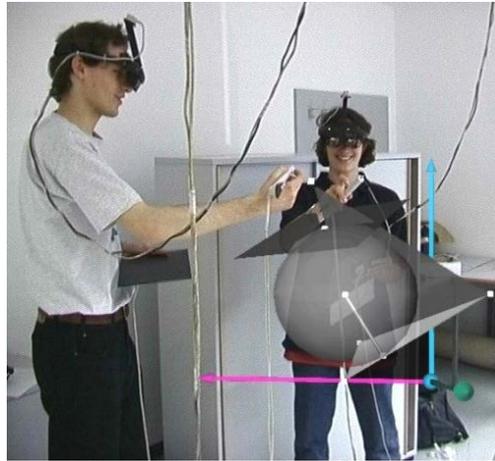


Abbildung 2-10: Lernen mit Construct3D. Tutor assistiert Lernendem bei der Konstruktion [Kau04]

### 2.1.3.3 Medizin

Der Fokus medizinischer AR-Anwendungen liegt in der Visualisierung komplexer Datensätze aus Voruntersuchungen (CT, MRI, Ultraschall, usw.) samt Annotationen auf dem Patienten [SLW02, BOH+08]. So lassen sich bei Operationen Röntgenbilder oder Ultraschalldaten einblenden, ohne dabei den Blick von der Eingriffsstelle abzuwenden.

Ein wichtiger Forschungsbereich der medizinischen AR sind effiziente Methoden zur präzisen Objektregistrierung (Instrumente und Organe), welche bedeutend für verschiedene medizinische Problemstellungen wie zum Beispiel die Instrumentennavigation während einer Operation [KTH+07] oder die automatische Generierung von Operationsworkflows sind [PBFN07].

### 2.1.3.4 Militär

Im militärischen Bereich wird Augmented Reality sowohl für Trainingszwecke [BSC06, LRJ+02] als auch zur Unterstützung im Gefecht eingesetzt [JBL+00]. Dabei kann zwischen militärischem Gerät mit fest installierter AR-Ausrüstung und mobilen Systemen zur Ausrüstung von Bodentruppen unterschieden werden. Im Fokus der militärischen Visualisierung liegen taktische Informationen, welche den Soldaten einen strategischen Vorteil verschaffen sollen.

### 2.1.3.5 Architektur und Geografie

Gute Perspektiven gibt es für AR-Systeme auch bei Gebäudeplanung und -entwurf. Es existieren erste Systeme, die es ermöglichen Baukonzepte in der realen Umgebung zu betrachten und zu manipulieren [WFM+96, BWB99, SS07]. Höhl propagiert den sinnvollen Einsatz von AR in allen Lebenszyklusphasen eines Gebäudes: Entwurf, Planung, Ausführung, Wartung und Service [Höh06], wobei für Wartung und Service vorzugsweise mobile Systeme im Frage kommen. Die Visualisierung von Daten aus Geoinformationssystemen oder neuen Gebäuden in bestehenden Umgebungen bietet ebenfalls Anwendungsmöglichkeiten für AR, indem Anwender umgebungsrelevante Informationen lagerichtig visualisiert bekommen [SRM+07, RJM+07]. Im Consumerbereich existieren Anwendungen mit heute verfügbaren Mobiltelefonen, welche durch die Kopplung von GPS, Kamera und Bewegungssensoren Informationen zu interessanten Orten lagerichtig im Kamerabild dargestellt [TCG+08, MPS09].

### 2.1.3.6 Industrie

Bereits Anfang der 90er Jahre entwickelte David Mizell beim Flugzeughersteller Boeing ein AR-System, um das Zusammenstellen von Kabelsträngen für Flugzeuge zu unterstützen [Miz01, CM92]. Das System AREAS (Augmented Reality for Evaluating Assembly Sequences) ermöglichte die Aufzeichnung von Montagesequenzen zur Analyse einer geplanten Montagefolge. Seither sind im Rahmen von Forschungsprojekten zahlreiche Prototypen in vielen industriellen Einsatzbereichen entstanden. Eines der bedeutendsten industriellen Forschungsprojekte stellt das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „ARVIKA“ dar, in dem von 1999 bis 2003 18 namhafte Unternehmen und Institutionen den Einsatz der Augmented Reality Technologie in den Anwendungsbereichen Entwicklung, Produktion und Service für Automobil- und Flugzeugbau sowie Maschinen- und Anlagenbau untersuchten [Fri04]. Im darauf aufbauenden ARTESAS Projekt wurden AR-Basistechnologien für den Einsatz im industriellen Serviceumfeld auf Basis der ARVIKA-Ergebnisse weiter erforscht und erprobt [FW06].

Die möglichen Einsatzbereiche für Augmented Reality erstrecken sich in der Industrie von der Produktentstehung über deren Nutzung bis zur Produktverwertung [Alt02]. Im AVILUS-Projekt wurden VR- und AR-Technologien für Anwendungen in Design, Konstruktion, Planung, Fertigung, Betrieb, Service, Wartung, Präsentation und Training im Produkt- und Produktionsmittellebenszyklus weiter erforscht [Sch08a, SSS09].

Im Design und in der Produktentwicklung werden zunehmend Mixed-Mock-Ups zur frühen Entscheidungsfindung genutzt. Mixed-Mock-Ups sind visuelle Überlagerungen von realen Prototypen und virtuellen Simulationsdaten. Dabei werden Modelle in realer Größe und Modelle im verkleinerten Maßstab unterschieden [PTB+01, PLC01]. Im Fahrzeug- oder Flugzeugbau können Teile einer Instrumententafel oder unterschiedliche Cockpitvarianten lagerichtig in einem realen Fahrzeugmodell dargestellt werden [LBS00]. Diese Methode spart Kosten bei der Modellierung realer Prototypen und ermöglicht die einfache Einbindung des Endanwenders in den Gestaltungsprozess.

Für den Bereich der Konstruktion eignet sich AR besonders, um noch nicht real existierende Bauteile in reale Prototypen ein- oder auszubauen und somit Erreichbarkeits- sowie Ein- / Ausbauuntersuchungen durchzuführen [PNY+05]. Anwendungen aus dem Bereich der Produktionsplanung sind den vorgestellten Anwendungen aus dem Architekturbereich sehr ähnlich. Produktionsplaner können mit AR den Planungsstand neuer Produktionstechnik in der realen Fertigungsumgebung visualisieren, um die Planung vor der eigentlichen Umsetzung abzusichern [Doi03, GSB+07].

Für Fertigung und Betrieb wird vor allem mobilen AR-Systemen großes Potenzial bescheinigt [Tüm09]. Werkern können durch mobile AR-Systeme prozessunterstützende Hinweise zu einzelnen Arbeitsschritten eingeblendet werden, um Suchzeiten zu verringern und unnötige Kopf- und Augenbewegungen zu vermeiden [TOBM03]. Sauer et al. unterstützen mit einem AR-System auf Basis von Trackingdaten eines stereoskopischen Kamerabildes manuelle Montageprozesse. AR-Annotationen visualisieren zu erledigende Prozessschritte, während das Arbeitsergebnis durch einen Abgleich mit einer aus dem CAD-Modell generierten Referenzgeometrie überprüft wird [SBTM06]. Interessant erscheinen auch die Ausführung von Bohrlöchern an Flugzeugbauteilen [NC96] und die Unterstützung der Montage von Türschlössern oder von Getriebeteilen in der Automobilindustrie [RSKM99, EWJ+01].

Wie bereits angedeutet lassen sich diese Systeme gleichzeitig für Produktion und Qualitätssicherung nutzen. Sie ermöglichen zum Beispiel die Überprüfung von Längenmaßen von Bauteilen [CSW99]. Vorteile liegen dabei in der Früherkennung grober Messfehler und in der Zeiteinsparung bei Prüfungsvorgängen. Mit dem System KARMA (Knowledge based Augmented Reality for Maintenance Assistance) beschreiben Feiner et al. bereits 1993 ein AR-gestütztes Wartungssystem für Laserdrucker [FMS93]. Haringer und Regenbrecht [HR02] integrieren Standardsoftware (Power Point mit dem Tool PowerSpace) in AR-basierte Wartungsanleitungen, um umfangreiche Checklisten und Manuals in Papierform zu ersetzen.

### 2.1.4 Zusammenfassung, mobile und stationäre AR-Systeme

Viele Forschungsaktivitäten im Bereich der Augmented Reality legen einen starken Fokus auf die Entwicklungen von mobil einsetzbaren Systemen und Technologien. Lange Zeit waren Lösungen in diesem Bereich unter anderem durch die geringe Verarbeitungskapazität der zu Beginn eingesetzten Rechentechnik limitiert [Reg06].

Heute wird dieser Herausforderung durch Verfügbarkeit leistungsfähiger mobiler Geräte begegnet. So wurden prototypische mobile AR-Systeme sowohl für Outdoor- [HF04, PST04]) als auch für Indooranwendungen entwickelt [WPLS05, TRM+08]. Für fast alle industriellen Bereiche, bei denen manuelle Tätigkeiten einen hohen Unterstützungsbedarf durch Informationsbereitstellung haben, wurde großes Nutzenpotential nachgewiesen [Alt02]. Dennoch werden mobile AR-Systeme bis heute nicht in der Industrie eingesetzt. Die Gründe hierfür liegen sowohl in technologischen als auch in nutzerbezogenen Ursachen [Tüm09].

Mit dem Einsatz von stationären Systemen lassen sich Schwierigkeiten des Einsatzes mobiler AR-Anwendungen umgehen. Allgemein bedeutet stationär (von lat. statio: Stillstehen) „fest verortet, stillstehend, bleibend“, so dass als stationär angesehene Objekte oder Systeme keine Relativbewegungen zu umgebenden Bezugsobjekten durchführen. Stationäre AR-Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass die Anwender keine AR-spezifische Ausrüstung am Körper mitführen und die Visualisierung in der Regel als mehrbenutzerfähige monitorbasierte Lösung umgesetzt ist [BTP08]. Die Signalverarbeitung bzw. das Anzeigen der AR-Szene kann zeitlich und räumlich getrennt von der Realitätserfassung (Filmen und Fotografieren) stattfinden, was den Einsatz von leistungsfähiger, stationärer Rechen- und Visualisierungstechnik ermöglicht. Eine definitionsgemäße Interaktion mit der AR-Szene ist dabei jedoch nicht möglich, so dass in diesem Fall oft von Augmented Vision gesprochen wird.

Neben der Abgrenzung stationärer und mobiler AR-Systeme durch die von Anwender am Körper mitgeführte technische Ausrüstung existieren in der Literatur weitere Unterscheidungskriterien. Nach Tümler ist ein Abgrenzung stationärer und mobiler AR-Systeme durch den Grad der räumlichen Kopplung der Systemelemente menschliches Auge, Display und Tracking möglich, wobei unter Tracking hier sowohl aktive (z.B. Kamera) als auch passive Komponenten verstanden werden. Stationäre Systeme zeichnen sich demnach durch eine lose räumliche Kopplung dieser Systemelemente aus, wohingegen mobile Systeme zumindest eine räumlich feste Verbindung von Display und Kamerasystem besitzen [Tüm09]. Abgesehen von dieser Abgrenzung definieren sich mobile AR-Systeme durch die freie Beweglichkeit von Person [SB07] und AR-Technik [ABB+01]. Die Portabilität der Technik

ist notwendig, da die primäre Aufgabe der Nutzer mobiler AR-Systeme nicht die Handhabung der AR-Anwendung, sondern die Durchführung eines durch AR unterstützten Prozesses darstellt [Tüm09].

Ausschlaggebend für die Unterscheidung mobiler und stationärer AR-Systeme sind demnach nicht allein die räumliche Kopplung der Systemelemente Auge, Display, Tracking oder das Bezugsobjekt, auf welches sich die Relativbewegung des AR-Systems bezieht. Auch die vom Anwender durchgeführten Arbeitsinhalte sind bei der Klassifizierung stationärer AR-Systeme von Bedeutung. Für stationäre AR-Systeme können im Rahmen dieser Arbeit zwei grundlegende Eigenschaften abgeleitet werden:

- Stationäre Augmented Reality Systeme beinhalten technische Ausrüstung, die nicht permanent von dem/n Nutzer/n mitgeführt wird.
- Die Benutzung des AR-Systems ist ein primärer Arbeitsinhalt für den Anwender.

## **2.2 Fabrikplanung**

Das Fachgebiet der Fabrikplanung bildet einen wesentlichen Teilkomplex der Unternehmensplanung (vgl. Abbildung 2-13, Seite 30). Gegenstand der Fabrikplanung sind die Standortbestimmung, die Gebäudeauswahl und -anordnung, die Gestaltung der Produktionsprozesse (Fertigungs- und Montageprozesse) einschließlich der einzuordnenden Logistikprozesse (Transport und Lagerung) und der erforderlichen Nebenprozesse (Betriebsmittelbau, Instandhaltungsprozesse u. a.) sowie deren Realisierung und Inbetriebnahme. Aus der Literatur bekannte Synonyme für den Begriff der Fabrikplanung sind Werkplanung und auch Werkstrukturplanung, welche vereinfacht ausgedrückt die vorausbestimmte Gestaltung industrieller Fabrik- bzw. Produktionssysteme beschreiben [Gru09].

### **2.2.1 Definitionen**

Den folgenden Begriffsdefinitionen liegt im Wesentlichen die VDI-Richtlinie 5200 zugrunde, welche den aktuellen Entwicklungsstand auf dem Gebiet der Fabrikplanung und insbesondere das dabei angewandte Planungsvorgehen beschreibt [VDI5200].

#### **Fabrik**

Die Fabrik bezeichnet den Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet.

Unter Produktion werden hier jene zur betrieblichen Leistungserstellung erforderlichen Tätigkeiten verstanden, die unmittelbar an der Produktherstellung beteiligt sind. Diese umfassen insbesondere die Prozesse Konstruieren und Arbeitsplan erstellen, Fertigen und Montieren, Lagern und Transportieren, Prüfen, Planen und Steuern, Waren vereinnahmen und versenden sowie Hilfsprozesse wie Instandhalten.

### **Planung**

Planen ist die gedankliche Vorwegnahme des zukünftigen Aufbaus und Ablaufs sowie von zukünftigen Zuständen und Prozessen der Produktion, welche zur Erreichung eines angestrebten Ergebnisses als erforderlich erachtet werden. Dabei sind in befristeter Zeit mit vorgegebenen Kosten unter Berücksichtigung aller wesentlichen Einflussgrößen die dazu notwendigen Entscheidungen vorzubereiten [Wie89, Sch95].

### **Fabrikplanung**

Fabrikplanung ist der systematische, zielorientierte, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierte und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführte Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion. Sie kann ebenso die später folgende Anpassung im laufenden Betrieb beinhalten.

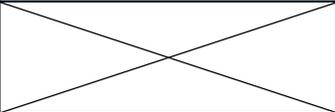
#### **2.2.2 Planungsfälle und Planungsursachen**

Der Fabrikplanungsprozess kann verschiedene Anlässe haben sowie unterschiedliche Planungsfälle umfassen. Aus dem Lebenszyklus einer Fabrik (vgl. [SW04]) lassen sich folgende vier grundsätzliche Planungsursachen ableiten:

1. Eine Neuplanung ist die Planung einer Fabrik auf der „grünen Wiese“. Dabei sind als bauliche Restriktionen das Gelände und die vorhanden Infrastruktur, nicht aber eine gegebenenfalls vorhandene Bausubstanz zu berücksichtigen.
2. Eine Umplanung betrifft eine bestehende Fabrik. Dabei sind die vorhanden Produktionsfaktoren sowie die Restriktionen des laufenden Fabrikbetriebes zu berücksichtigen (Beispiele: Anpassungsplanung, Erweiterungsplanung, Produktionsoptimierung).
3. Ein Rückbau erfolgt, wenn eine Fabrik stillgelegt und demontiert wird, um das Gelände zur Nachnutzung vorzubereiten.
4. Eine Revitalisierung erfolgt, wenn eine Industriebrache zur erneuten industriellen Nutzung verfügbar gemacht wird.

Daraus ergeben sich die fünf Planungsfälle Neu-, Ähnlichkeits-, Varianten-, Anpassungs- und Wiederholplanung. Diese lassen sich wie in Tabelle 2-1 dargestellt den beiden grundlegenden Planungsprinzipien des Generierungs- und des Ähnlichkeitsprinzips zuordnen [EMPT96].

Tabelle 2-1: Planungsfälle nach Eversheim et al.

		Planungsanlass		
		Neuerstellen	Ändern	Wiederholen
		Neuanlegen eines Plans	Ändern existierender Pläne	Aktivieren existierender Pläne
Planungsprinzip	Generierungsprinzip	Neuplanung		
	Ähnlichkeitsprinzip	Anpassungsplanung		
		Variantenplanung	Wiederholplanung	

### 2.2.3 Planungsziele und -inhalte

Als klassische Ziele der Fabrikplanung werden in der Literatur die Maximierung von Wirtschaftlichkeit, Attraktivität und Flexibilität angeführt [WH92]. Zum Erreichen dieser übergeordneten Ziele findet eine Zerlegung in Teilziele statt. So wird die Wirtschaftlichkeit einer Fabrik durch Wertschöpfung, Durchlaufzeit und Bestandsvolumen charakterisiert, während sich die Attraktivität durch das Erscheinungsbild, die Umweltbilanz und die Arbeitsplatzgestaltung kennzeichnet. Flexibilität wird sowohl bei Mensch, Technik und Organisation angestrebt, da bis zum Ende des Planungsprozesses Änderungen der Rahmenbedingungen besondere Ansprüche an die Anpassung der Planung stellen. Die Planung muss so gestaltet werden, dass schnell und unkompliziert auf geänderte Vorgaben reagiert und ein Planungskonzept angepasst werden kann, da der Aufwand in der Regel umso größer ist, je später eine Änderung vorgenommen wird [Bul95]. Die unterschiedliche Gewichtung der einzelnen Ziele führt zu einem spezifischen Zielprofil für die zu planende Fabrik.

Inhaltlich umfasst die Fabrikplanung die Planung aller technischen und einiger betriebswirtschaftlichen Aktivitäten, die zur Herstellung verkaufsfähiger Produkte durchgeführt werden müssen. Eine Abgrenzung dieser Aktivitäten ist durch die ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklusmodells eines Produkts möglich [ADEK05]. Abbildung 2-11 stellt diese Aktivitäten aus Sicht technischer und betriebswirtschaftlicher Auftragsabwicklung im Kontext des allgemeinen Produktlebenszyklus dar.

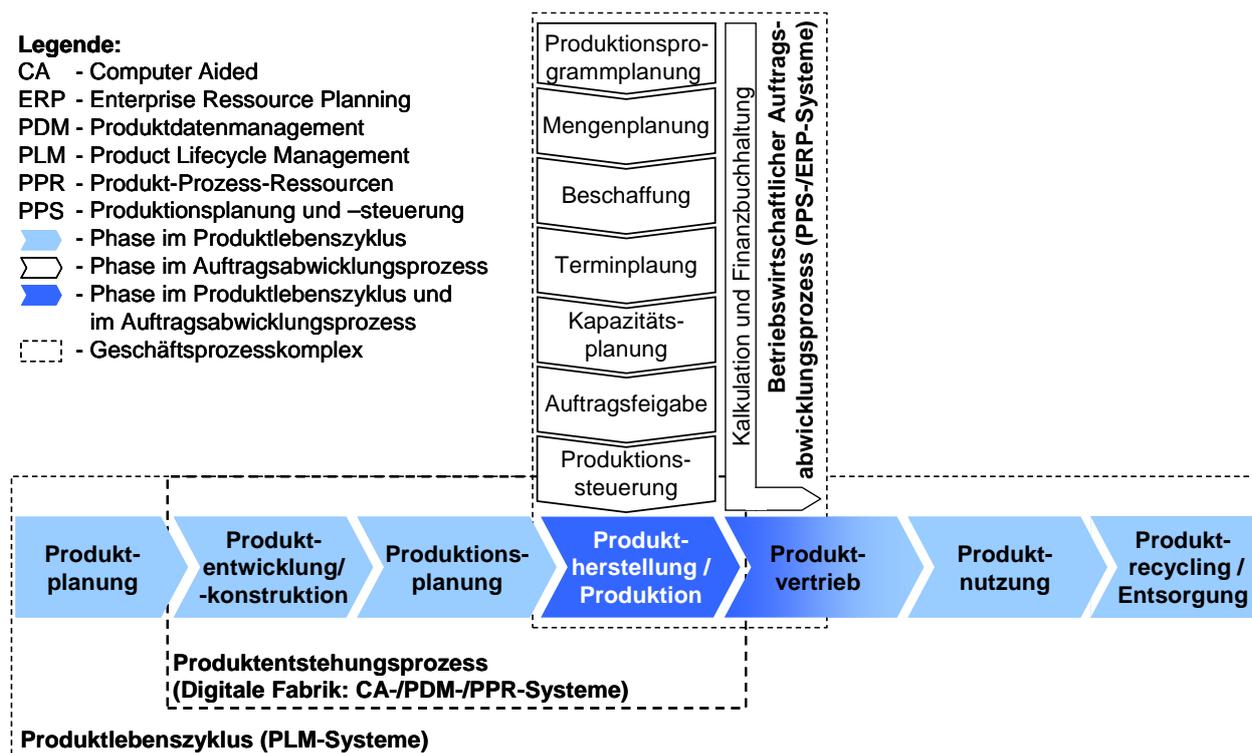


Abbildung 2-11: Abgrenzung von Produktlebenszyklus, Produktentstehungs- und Auftragsabwicklungsprozess [Sch07]

Zur betriebswirtschaftlichen Auftragsabwicklung im üblichen Sinne, zählen die Produktionsprogrammplanung, die Beschaffung, die Mengen- und Terminplanung, die Kalkulation sowie die Finanzbuchhaltung. Die technische Auftragsabwicklung enthält die Produktentwicklung und -konstruktion, die Produktionsplanung, die Produktion sowie den Vertrieb [PBF05].

### 2.2.4 Produktionsplanung

Abbildung 2-12 illustriert die Einordnung der Produktionsplanung in den Produktentstehungsprozess und stellt die damit verbundenen Verläufe von festgelegten Kosten und Änderungsaufwand dar. Dabei wird die herausragende Bedeutung der Produktionsplanung deutlich, da diese Phase in hohem Maße für die projektbezogenen Gesamtkosten verantwortlich ist. Zum einen werden hier alle wesentlichen Entscheidungen bezüglich der Prozess- und Produktionsgestaltung getroffen (z.B. Technologie-, Betriebsmittelauswahl). Zum anderen entstehen in dieser Phase die meisten Fehler, die dann im späteren Projektverlauf (insbesondere während der Anlaufphase) mit einem immensen Zeit- und Kostenaufwand behoben werden müssen [Puh90, VDI2247].

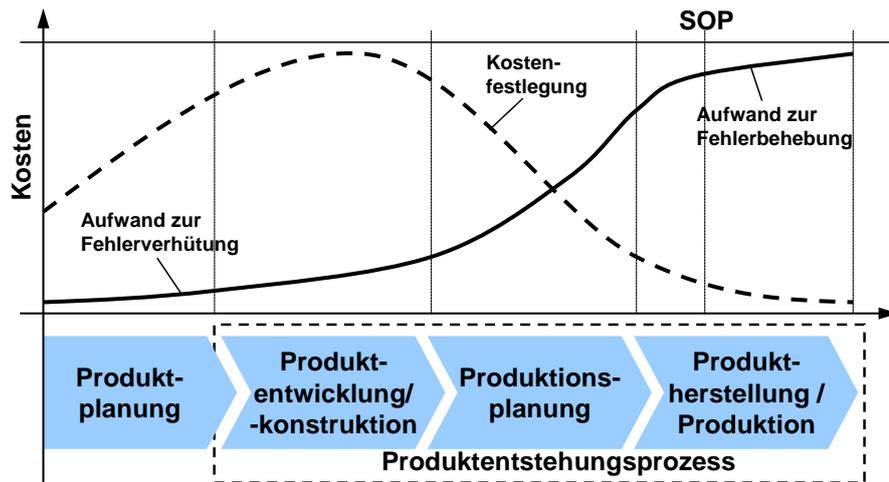


Abbildung 2-12: Kostenfestlegung und Änderungsaufwand im Produktentstehungsprozess nach [Kie07]

In der Literatur existieren unterschiedliche Systematiken, die die Aufgaben der Produktionsplanung beschreiben. Sie unterscheiden sich in ihrem Detaillierungsgrad und in der Wahl der Begrifflichkeiten. Für den Begriff der Produktionsplanung - mit Bezug auf die Produktentstehung - werden verschiedene Termini synonym verwendet. Gängige Alternativbezeichnungen sind Fertigungsplanung, Fertigungsvorbereitung, Arbeitsplanung und Arbeitsvorbereitung. Obwohl die Fertigungsplanung nur einen Teilkomplex der Produktionsplanung abdeckt, nämlich die Planung der Herstellung von Material oder Erzeugnissen [Dan99], stellt Wiendahl heraus, dass sämtliche dieser Begriffe sich semantisch auf den gesamten Herstellungsprozess einschließlich der Montage beziehen und sowohl einen planenden als auch einen steuernden Bestandteil implizieren [Wie89]. Grundsätzlich wird diese Sichtweise auch an anderen Stellen in der Literatur geteilt [EMPT96, Sch95, SK97]. Somit fasst der Begriff der Produktionsplanung die Fertigungsplanung und die Montageplanung zusammen.

Die Produktionsplanung stellt einen wichtigen Teilkomplex der Unternehmensplanung dar. Um die Komplexität des Produktionsplanungsprozesses zu beherrschen erfolgt eine strukturierte Zerlegung in dedizierte Planungsaufgaben, deren Bearbeitung in verschiedenen Teams parallel angestrebt wird [SK97]. Abbildung 2-13 visualisiert die Aufgaben der Produktionsplanung und deren Inhalte im Kontext der Unternehmensplanung.

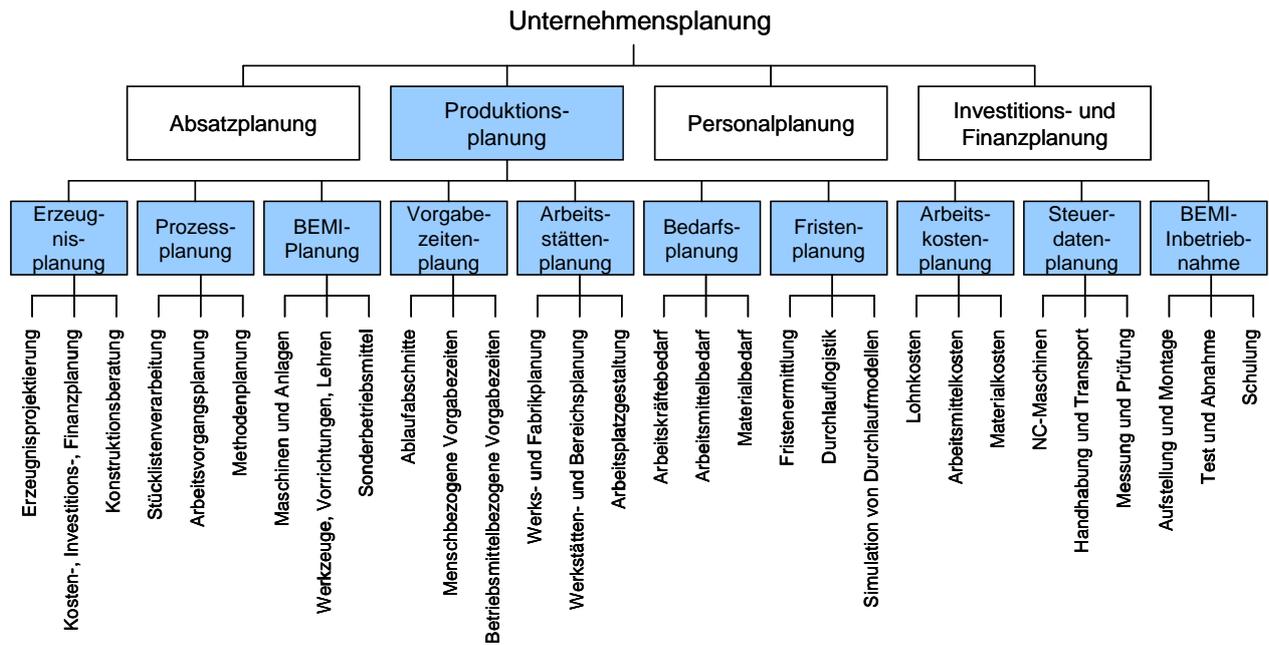


Abbildung 2-13: Aufgaben der Produktionsplanung in Anlehnung an [SK97, Wie89]

Nachfolgend werden die definierten Produktionsplanungsaufgaben auf Basis der Ausführungen von Wiendahl inhaltlich beschrieben [Wie89].

- In der *Erzeugnisplanung* werden zur Erzeugnisprojektierung die Termine und die Meilensteine festgelegt. Ebenso werden für die notwendige Betriebsausstattung die Kosten, die Investitionen und die Finanzen geplant. Weiterhin erfolgt zur produktionsgerechten Erzeugnismittelgestaltung eine Konstruktionsberatung.
- Bei der *Prozessplanung* werden die Konstruktionsstücklisten zu Fertigungs- und Montagestücklisten durch Stücklistenverarbeitung angepasst. In der Arbeitsvorgangsplanung werden die Fertigungs- und die Montagereihenfolge festgelegt. Für wiederkehrende Arbeitsvorgänge werden Methoden in Bezug auf Technologien und die Organisation geplant (auftragsneutrale Prozessstandardisierung).
- In der *Betriebsmittelplanung* werden die Maschinen und Anlagen, die Spezialwerkzeuge, die Spannvorrichtungen, die Prüflehren sowie die Sonderbetriebsmittel für die Werkstückfertigung bzw. -bearbeitung und die Erzeugnismontage bestimmt, ausgewählt und ggf. entwickelt.
- Für die *Vorgabezeitenplanung* werden die notwendigen Produktionsabläufe zunächst in einzelne Abschnitte unterteilt. Anschließend werden sowohl bezogen auf den Menschen als auch auf das Betriebsmittel die Soll-Zeiten nach einzelnen Ablaufarten synthetisch ermittelt.

- Mit der *Arbeitsstättenplanung* erfolgt die Planung ganzer Werke bzw. Fabriken, einer Werkstatt oder eines Fabrik- bzw. eines Produktionsbereichs. Ferner werden einzelne Arbeitsplätze ergonomisch gestaltet.
- In der *Bedarfsplanung* werden zur Ausführung eines Arbeitsvorgangs die notwendigen Arbeitskräfte, die Arbeitsmittel und das Material nach Art und Menge bestimmt, um ein Mengengerüst abzuleiten.
- Für die *Fristenplanung* werden die Durchlaufzeiten oder -fristen für Werkstücke, Baugruppen und Erzeugnisse auf der Basis von statistischen Erhebungen und simulativen Auswertungen ermittelt.
- Die *Arbeitskostenplanung* bezieht sich auf die Festlegung der Kosten für die Arbeitskräfte, die Arbeitsmittel und das Material auf der Basis des in der Bedarfsplanung ermittelten Mengengerüsts.
- Bei der *Steuerdatenplanung* werden die Programme für numerisch gesteuerte Werkzeugmaschinen, Handhabungs-, Transport- und Messeinrichtungen erstellt.
- Mit der *Betriebsmittelinbetriebnahme* erfolgt die Aufstellung und die Montage der Betriebsmittel sowie deren Test und Abnahme. Zugleich werden die Mitarbeiter hinsichtlich der Anwendung der Betriebsmittel qualifiziert und geschult. Bei Bedarf werden auch neue Mitarbeiter ausgewählt und eingestellt.

## 2.3 Die Digitale Fabrik

Die Digitale Fabrik implementiert Modelle und Methoden und stellt somit Werkzeuge zur Verfügung, um den Prozess der Fabrikplanung (vgl. Kapitel 2.2) durchzuführen. Die Modelle der Digitalen Fabrik bilden alle dabei produktionsrelevanten Objekte einer realen Fabrik ab und ermöglichen, diese vor der Realisierung virtuell zu planen und zu testen, um neben der Planungsqualität auch die Planungssicherheit zu steigern [Gol04]. Abbildung 2-14 ordnet die dabei genutzten Technologien den einzelnen Phasen des Produktentstehungsprozesses (vgl. Abbildung 2-11, Seite 28) zu. Eine ausführliche Beschreibung der Techniken findet in Abschnitt 2.3.3 statt.

Im neueren Verständnis endet die Digitale Fabrik nicht mit Beginn der Produktion. Sie unterstützt auch die Nutzungsphase (Betrieb und Instandhaltung) der realen Fabrik [Man09, Sch09]. Die Integration der Digitalen Fabrik in den Produktlebenszyklus über die Produktentstehung hinaus wird durch den Einsatz von PLM-Systemen möglich.

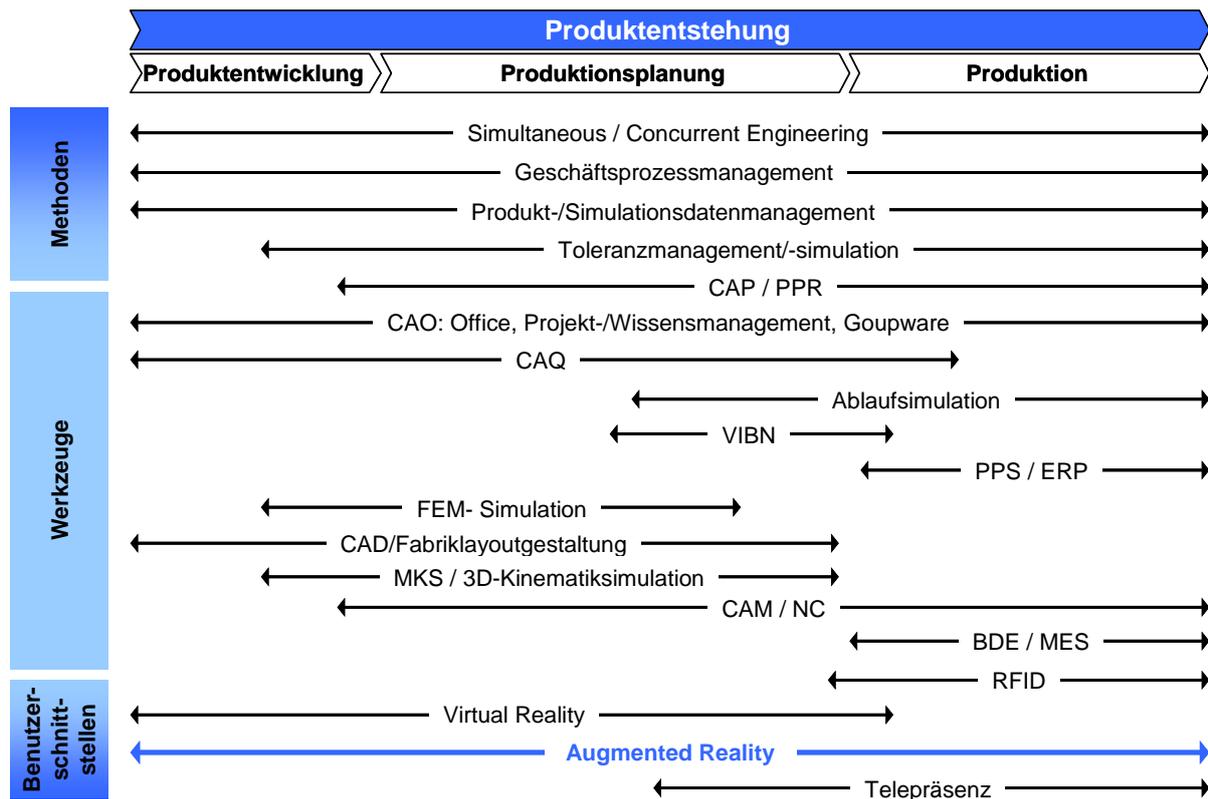


Abbildung 2-14: Techniken der Digitalen Fabrik im Produktentstehungsprozess, Entwurf nach [ZS06]

Entscheidend für den Erfolg der Digitalen Fabrik sind Vollständigkeit, Reihenfolge und Datenaktualität. Vollständigkeit bezeichnet die Abbildung sämtlicher Fertigungs- und Logistikprozesse, welche die reale Fabrik kennzeichnen. Die Prämisse der Reihenfolge besagt, dass die reale Fabrik erst gebaut wird, wenn Stückzahl und Qualität in der Digitalen Fabrik nachgewiesen wurden. Unter Aktualität wird das Kriterium verstanden, dass die Digitale Fabrik zu jedem Zeitpunkt der Produktlaufzeit ein Abbild der realen Fabrik ist.

### 2.3.1 Definition

In der VDI-Richtlinie 4499 wird die Digitale Fabrik wie folgt definiert:

*„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen - u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung -, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.*

*Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ [VDI4499]*

### 2.3.2 Ziele

Durch den Einsatz der Digitalen Fabrik sollen Planungs- und Anlaufzeiten erheblich verkürzt und die Planungsqualität maßgeblich gesteigert werden. Abbildung 2-15 stellt diese Zielstellung als Vergleich zwischen einer klassischen Anlaufkurve (schwarz) und einer durch den Einsatz von Werkzeugen der DF angestrebten, optimierten Anlaufkurve (blau) dar.

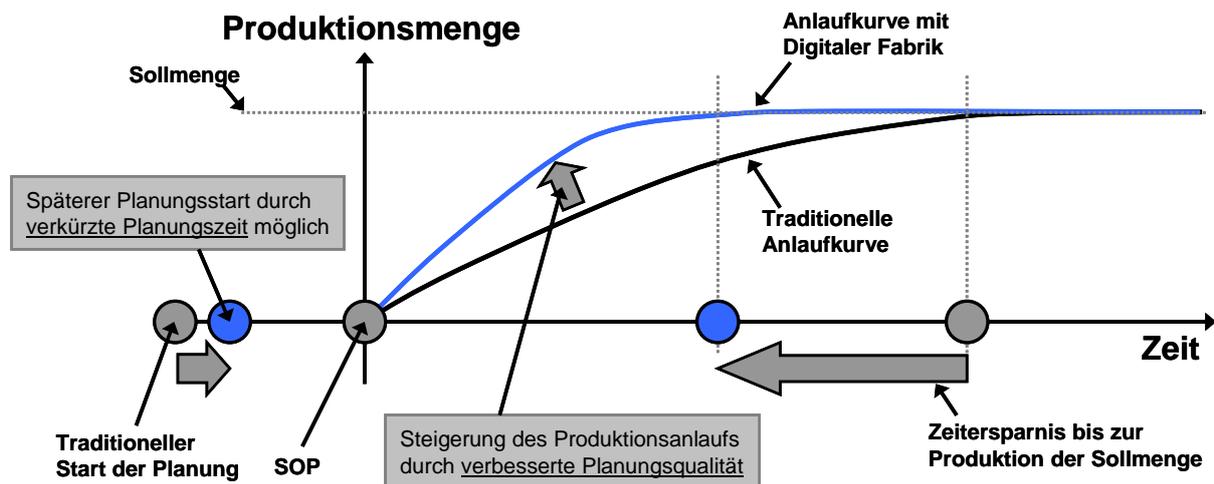


Abbildung 2-15: Produktionsanlaufkurve mit und ohne Digitale Fabrik nach [Gol04]

Die Strategie zur Optimierung des Produktanlaufs wird durch die Umsetzung zweier wesentlicher Teilziele erreicht. Die virtuelle Absicherung der geplanten Fabrik liegt als erstes Teilziel der Digitalen Fabrik offensichtlich auf der Hand. Das zweite Teilziel wird durch den frühen Einsatz digitaler Planungswerkzeuge ermöglicht und besteht in der Produktbeeinflussung aus Fertigungssicht. Finales Ziel für die Fabrikplanung ist ein nach Fertigungsgesichtspunkten optimiertes Produkt und eine Fabrik mit optimal darauf ausgerichteten Prozessen.

### 2.3.3 Funktionen und Techniken der Digitalen Fabrik

In der Literatur sind die Funktionen, die die Techniken der Digitalen Fabrik leisten sollen bzw. können, ausführlich beschrieben, werden jedoch kaum systematisiert aus ganzheitlicher Sichtweise betrachtet [SB05, Küh06]. Nach Schack bieten die semantischen Erläuterungen der Produktionsplanungsaufgaben (vgl. Abbildung 2-13, Seite 30) eine logische Basis zur Funktionsbeschreibung, so dass auf diese zurückgegriffen werden kann. Damit können die nachfolgend im Wesentlichen beschriebenen Funktionen für einzelne oder mehrere Techniken der Digitalen Fabrik abgeleitet werden [Sch07]:

1. *Prozessplanung der Einzelteilefertigung*: Bearbeitungsfolgen und Maschinenbelegung festlegen; Fertigungstechnologien und Werkzeuge auswählen; Erzeugnismaße und -toleranzen mitgestalten sowie deren Prüfung planen; Fertigungskosten ermitteln; NC-Programme erstellen;
2. *Prozessplanung der Montage*: Montagefolgen festlegen, abtackten, dokumentieren und kostenrechnerisch bewerten; Planungsergebnisse mit der Fertigung abstimmen; Erzeugnismaße und -toleranzen mitgestalten sowie deren Prüfung planen;
3. *Struktur- und Anlagenplanung*: Fabriken entwerfen; Gebäude technisch ausrüsten; Förder- und Einrichtungstechnik bestimmen; Handhabungs- und Transportanlagen sowie deren Zusammenwirken definieren;
4. *Betriebsmittelplanung*: Betriebsmittel entwickeln und beschaffen;
5. *Logistikplanung*: unternehmensübergreifende Logistik (Produktionsnetzwerk), Teileversorgung, Materialfluss und Materialbereitstellung planen;
6. *Struktur-, Anlagen- und Ablaufsimulation*: Fertigungs- und Montagefolgen hinsichtlich Machbarkeit, Effektivität und Effizienz absichern sowie bezüglich kritischer Vorgänge überprüfen;
7. *Ergonomieabsicherung*: Arbeitsfolgen mit Menschmodellen ergonomisch absichern; Belastungen am Arbeitsplatz ermitteln; Arbeitsplätze ergonomisch gestalten;
8. *Prozesssimulation*: Fertigungs- und Montagevorgänge wie z. B. Umformen, Tiefziehen, Stoffeigenschaften ändern, Spanen, Schweißen, Kleben und Beschichten sowie Mess- und Prüfvorgänge simulieren; die Ausführung des dazugehörigen NC-Programmcodes simulieren;
9. *Inbetriebnahme- und Anlaufabsicherung*: Maschinen- und Anlagensteuerungen sowie NC-Programme erstellen und simulieren;
10. *Datenverwaltung und -steuerung*: Produkt-, Prozess-, Betriebsmittel- und Simulationsdaten speichern, vor Missbrauch schützen, suchen und redundanzfrei bereitstellen; Dokumente freigeben, ändern und verteilen sowie elektronisch abzeichnen.

Die genannten Funktionen beschreiben die Anforderungen an die Techniken der Digitalen Fabrik, welche im Anhang A.1 (Seite XLI ff.) dokumentiert sind. Tabelle 2-2 ordnet die Techniken der Digitalen Fabrik den zuvor definierten Funktionen zu:

Tabelle 2-2: Zuordnung von Techniken der Digitalen Fabrik zu Funktionen (Entwurf nach [Sch07])

Funktion	Technik der Digitalen Fabrik*																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1. Fertigungsprozessplanung	•	•	•	•	•	•	•								•		•	•	
2. Montageprozessplanung	•	•	•	•	•	•	•								•		•	•	
3. Struktur-/Anlagenplanung	•	•			•	•		•				•			•		•	•	•
4. Betriebsmittelplanung	•	•	•	•	•	•				•	•	•	•		•		•	•	•
5. Logistikplanung	•	•				•		•		•					•	•	•	•	
6. Struktur-/Anlagen-/Ablaufsimulation	•	•	•					•	•			•	•		•		•	•	
7. Ergonomieabsicherung	•	•	•									•	•				•	•	
8. Prozesssimulation	•	•	•	•			•		•		•	•	•	•			•	•	
9. Inbetriebnahme und Anlaufabsicherung	•	•	•					•	•				•	•				•	
10. Datenverwaltung/-steuerung	•	•	•		•	•									•				

\*Technik der DF:

- 1 – SE / CE
- 4 – Toleranzmanagement/ TS
- 7 – CAQ
- 10 – PPS / ERP
- 13 – MKS / 3D-Simulation
- 16 – RFID
- 19 – Telepräsenz

- 2 – GPM
- 5 – CAP / PPR
- 8 – Ablaufsimulation
- 11 – FEM- Simulation
- 14 – CAM / NC
- 17 – Virtual Reality

• – Technik ist der Funktion zugeordnet

- 3 – PDM / SDM
- 6 – CAO
- 9 – VIBN
- 12 – CAD / Layoutgestaltung
- 15 – BDE / MES
- 18 – **Augmented Reality**

Die in Tabelle 2-2 gegebenen Verknüpfungen lassen sich wie folgt erklären:

Das Simultaneous bzw. das Concurrent Engineering (SE/CE) und das Geschäftsprozessmanagement (GPM) werden aus organisatorisch-methodischer Sicht als eine Basistechnik gesehen. Um für eine effiziente Produktentstehung die Unterstützung von Softwarewerkzeugen nutzen zu können, müssen die Teilprozesse in der Produktionsplanung organisatorisch so weit wie möglich parallelisiert und kontinuierlich verbessert werden.

Das Produkt- und das *Simulationsdatenmanagement* (PDM/SDM) sowie die *Betriebsdatenerfassung* (BDE) und *Manufacturing-Execution-Systems* (MES) sind aus datentechnischer Sicht grundlegende Techniken der Digitalen Fabrik. Speziell für die Prozessplanung nehmen in diesem Zusammenhang CAP- und PPR-Systeme eine bedeutende Rolle ein. Sämtliche dieser Techniken sind multifunktional, wodurch ihre breite Zuordnung zu begründen ist. PPS- bzw. ERP-Systeme bieten aufgrund ihres Anwendungsfokus dagegen eine Vielzahl von Funktionen, die hauptsächlich den Auftragsabwicklungsprozess und nur geringfügig den Produktentstehungsprozess unterstützen.

*CAO-Systeme* (Textverarbeitung, Tabellenkalkulation, Bildschirmpräsentation, E-Mail) sind relativ intuitiv und damit einfach zu bedienen. Sie decken daher eine Vielzahl der von den Planungsaufgaben geforderten Funktionen ab. Allerdings sind CAO-Systeme eher auf allgemeine Büroarbeiten und nicht auf die Komplexität der Produktentstehung mit Ingenieur Tätigkeiten ausgelegt.

Die *Ablaufsimulation* stellt Funktionen zur Verfügung, die insbesondere zur Planung auf der Fabrik- und der Anlagenebene benötigt werden. Mit ihrer Hilfe können speziell produktionslogistische Fragestellungen simuliert werden, die auch bei der (Virtuellen) Inbetriebnahme bedeutend sind.

*CAD-Systeme* bilden mit ihren Funktionen die Grundlage für die Bildung zwei- und dreidimensionaler Modelle, die in der Layoutgestaltung und in Simulationsanwendungen weiterverwendet werden. Bei letzteren sind besonders die Mehrkörpersimulation (MKS) und die 3D-Kinematiksimulation hervorzuheben, die bei der Planung auf der Anlagenebene ihre Hauptunterstützungsmöglichkeiten bieten.

*Virtual* und *Augmented Reality* bieten durch ihre Visualisierungs-, Interaktions- und Immersionsmöglichkeiten als Benutzerschnittstellen grundsätzliche funktionale und intuitive Unterstützung bei der Bearbeitung von Planungsaufgaben. Darüber hinaus kann AR als Schnittstelle zwischen Digitaler und Realer Fabrik wesentlich bei der Umsetzung der geplanten Inhalte unterstützen (vgl. Kapitel 2.1.3.6).

Die übrigen Techniken der Digitalen Fabrik erfüllen eher spezielle Funktionsanforderungen (vgl. Anhang A). Insgesamt wird festgehalten, dass für die einzelnen Anforderungen sowohl funktionsübergreifend als auch funktionspezifisch unterstützende Techniken der Digitalen Fabrik eingesetzt werden können. Insbesondere die AR-Technologie ermöglicht durch ihre Schnittstellenfunktion zwischen digitaler Planung und realer Welt die Unterstützung fast aller Planungsfunktionen im Rahmen der Digitalen Fabrik.

## 2.4 Soll/Ist-Vergleiche

Der Begriff des Soll/Ist-Vergleichs wird in vielen Domänen verwendet und als selbsterklärend beziehungsweise selbstverständlich betrachtet. Die aus der Literatur bekannten, konkreten Definitionen zum Geschäftsprozess eines Soll/Ist-Vergleichs entspringen zumeist der Domäne der Wirtschaftswissenschaften. Schwarz und Angermeier definieren den Soll/Ist-Vergleich als einen konkreten Geschäftsprozess, der in regelmäßigen zeitlichen Abständen die Differenz mindestens zweier vergleichbarer Mengen bestimmt [Sch08b, Ang09]:

- *„Ein Soll/Ist-Vergleich bezeichnet die Gegenüberstellung von Plan- und Ist-Werten / Mengen (eines Zeitabschnittes) einer Periode (z.B. Monate) zur Ermittlung von Verbrauchs- und Mengenabweichungen. [Sch08b]“*
- *„Der Soll-Ist-Vergleich ist die einfachste Form des Projekt-Controllings. In ihm werden die Abweichungen der Ist-Werte (z.B. Ist-Kosten, Ist-Arbeitszeit, Ist-Arbeitsmenge usw.) von den entsprechenden Sollwerten zu einem bestimmten Termin bestimmt. [Ang09]“*

Weniger eine Definition, dafür eine domänenspezifische Dienstleistungsbeschreibung aus dem Bereich der Ingenieurwissenschaften liefert das Unternehmen DESCAM 3D Technologies GmbH:

- *„Beim SOLL-/ IST-Vergleich werden die Scandaten mit dem CAD-Datensatz oder einem Referenzmodell verglichen. Dieser Vorgang ist vor allem für die Qualitätssicherung von großer Bedeutung.“*

*Der SOLL-/ IST-Vergleich wird darüber hinaus auch angewendet, um die Abnutzung eines Werkzeuges oder Bauteiles zu lokalisieren und zu quantifizieren, Verformungen aufzudecken oder gelieferte Ware auf Maßhaltigkeit zu überprüfen. [DES09]“*

Diese Begriffserklärung schränkt den Begriff auf die spezifische Anwendung des maßlichen Abgleichs geometrischer Modelle ein, wobei konkret die Anwendungsfelder Qualitätssicherung und Instandhaltung adressiert werden. Wie in den vorangegangenen Definitionen wird auch hier der Vergleich zweier quantifizierbarer Größen beschrieben, indem eine Differenz zwischen beiden gebildet wird. Jedoch wird kein expliziter Vergleichszeitpunkt genannt. Aufgrund der Werkzeugabnutzung lässt sich für die vorliegende Arbeit ableiten, dass dennoch eine Abhängigkeit des Vergleichsergebnisses vom Zeitpunkt der Vergleichsdurchführung besteht.

Es wird deutlich, dass Bedarf an einer allgemeingültigen Definition des Begriffes Soll/Ist-Vergleich besteht, aus der sich konkrete Geschäftsprozesse für andere Anwendungsbereiche ableiten lassen. Bisherige Definitionen sind sehr anwendungsspezifisch und werden den Anforderungen von Übertragbarkeit und Skalierbarkeit nicht gerecht. Im Folgenden wird ein allgemeingültiges Modell für einen Soll/Ist-Vergleich beschrieben, aus dem sich Geschäftsprozesse für konkrete Anwendungsfälle ableiten lassen. Diese Geschäftsprozesse sollen folgende zentrale Fragestellungen eindeutig klären:

- Welche Objekte / Entitäten werden miteinander verglichen?
- Welche Eigenschaften der Objekte sind vergleichbar?
- In welcher Einheit sind diese Eigenschaften messbar?
- Zu welchem Zeitpunkt findet der Vergleich statt?

Die Frage nach der Maßeinheit, die eine Objekteigenschaft beschreibt ist essentiell für einen Soll/Ist-Vergleich. Sie hat einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl des Vergleichsbeziehungsweise des Messwerkzeuges.

### 2.4.1 Definition

Aus den bisherigen Erkenntnissen lässt sich für den Begriff Soll/Ist-Vergleich folgende allgemeingültige Definition ableiten:

*„Ein Soll/ Ist-Vergleich ist die Identifizierung und Quantifizierung der Abweichung ( $\Delta_I$ ) des IST-Zustands  $Z_I$  eines Systems A von einem, ab dem Zeitpunkt  $t_S$  gültigen, SOLL-Zustand  $Z_S$  zu einem definiertem IST-Zeitpunkt  $t_I$ “*

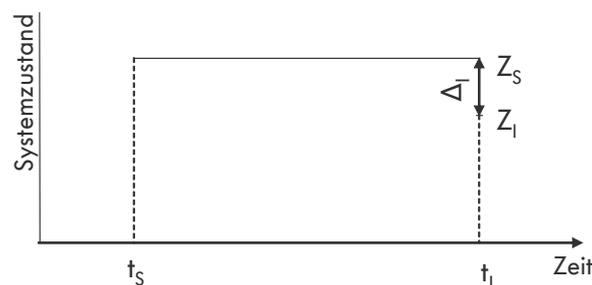


Abbildung 2-16: grafische Darstellung der Definition eines Soll/Ist-Vergleichs [eigener Entwurf]

Somit handelt es sich bei einer Soll/ Ist-Abweichung um eine Differenz.

$$\Delta_I = Z_S - Z_I \quad (2.1)$$

Das Bilden einer Differenz setzt die Vergleichbarkeit beider Operatoren voraus, was bedeutet, dass diese die gleiche Eigenschaft beschreiben - z.B. eine physikalische Größe wie Temperatur oder Entfernung.

In der Realität sind Systemzustände meist zu komplex, um sie durch eine einzige Eigenschaft zu beschreiben. Aus der allgemeinen Modelldefinition geht hervor, dass ein Modell stets ein abstraktes Abbild der Realität darstellt [Sta73] und somit eine Teilmenge der Eigenschaften eines realen Objekts abbildet. Daraus folgt:

- Die Menge realer Objekteigenschaften ist gleich oder mächtiger als die Menge von modellierten Objekteigenschaften und
- Jede modellierte Eigenschaft eines Modells besitzt ein reales Pendant.

Sollen komplexe Zustände vergleichbar gemacht werden, so ist dies durch den Vergleich der Zustände einzelner Eigenschaften möglich, da jede im SOLL-Zustand des modellierten Objektes vorkommende Eigenschaft von der Realität abweichen kann. Unter der Voraussetzung, dass jede Einzelabweichung quantifizierbar ist, ergibt sich die Gesamtabweichung eines Systems aus der Kombination aller normierten Einzelabweichungen wie folgt:

$$\Delta_I = \sum_{k=1}^n |\Delta_k| \quad \text{mit } n \in \mathbb{N}, \quad k = 1..n \quad (2.2)$$

## 2.4.2 Entstehen von Soll/Ist-Abweichungen

Für das Vorhandensein einer Abweichung ( $\Delta_I$ ) größer als Null existieren zwei grundlegend mögliche Ursachen. Entweder hat der definierte Sollzustand in der Realität (IST) nie existiert oder der definierte Sollzustand hat in der Realität existiert und wurde geändert. Abbildung 2-17 beschreibt den zweiten Fall durch dynamische Änderungen des Ist-Zustandes eines Systems über die Zeit.

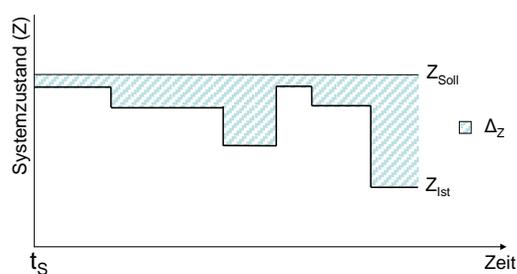


Abbildung 2-17: Änderung des Systemzustands über die Zeit [eigener Entwurf]

Wie in der Abbildung 2-17 dargestellt, treten zu diskreten Zeitpunkten Änderungen ein, die den Zustand eines Systems beeinflussen. Ein resultierender Zustand kann stärker vom definierten Sollzustand abweichen oder diesem mehr entsprechen. Die Zustandsbestimmung oder -vorhersage eines Systems erfordert Kenntnis über mögliche Einflussgrößen und deren Auswirkungen (vgl. Kapitel 4.2.1).

### 2.4.3 Abgrenzung

Dem *Soll/Ist-Vergleich* sehr ähnlich ist der Begriff der *Ist-Aufnahme*:

- „Unter *Ist-Aufnahme* wird die quantitative und qualitative Erfassung des *Ist-Zustandes* eines geschlossenen Systems unter Beachtung des zu untersuchenden *Tatbestandes* verstanden. [KFG02]“

Die *Ist-Aufnahme* ist bedeutsam für die Systemanalyse. Ihr Ziel ist die Beschreibung des aktuellen Zustandes eines Systems ohne diesen gegen einen Sollzustand zu vergleichen. Darin liegt der wesentliche Unterschied zu einem Soll/Ist-Vergleich. Die *Ist-Aufnahme* kann als Prozessvorbereitung zur Durchführung eines Soll-Ist-Vergleichs gesehen werden (vgl. Abbildung 2-18).

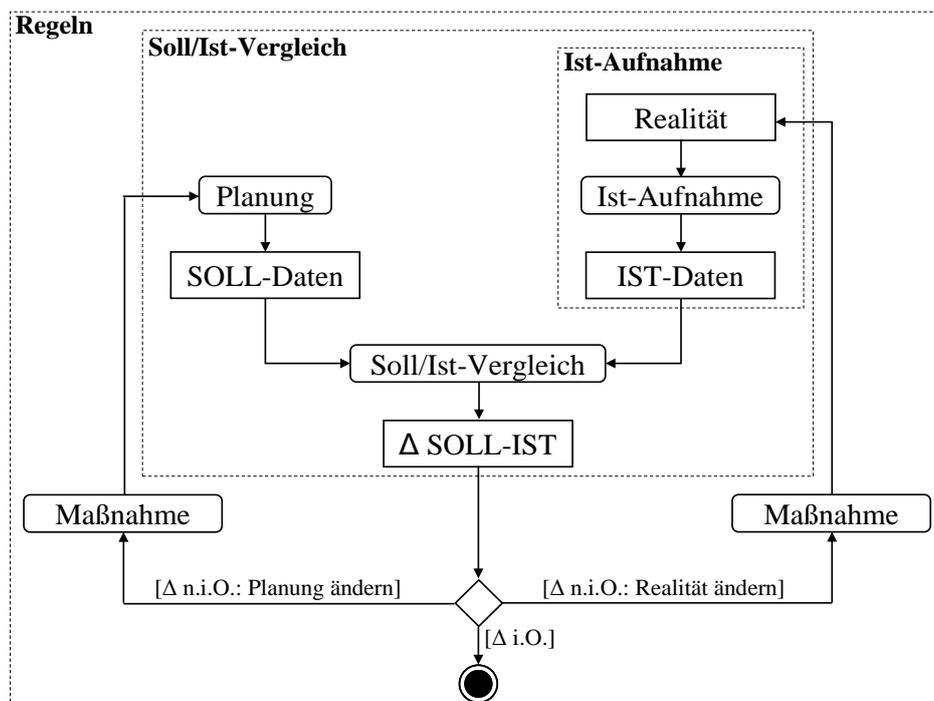


Abbildung 2-18: Abgrenzung *Ist-Aufnahme*, *Soll/Ist-Vergleich*, *Regeln* [eigener Entwurf]

Neben der Abgrenzung von *Soll/Ist-Vergleich* und *Ist-Aufnahme* verdeutlicht Abbildung 2-18 den Unterschied zum Begriff *Regeln*. Das Ergebnis eines Soll/Ist-Vergleichs ist lediglich ein Wert, der eine Abweichung beschreibt. Dabei wird das betrachtete System in keiner Weise verändert. Im Gegensatz dazu hat der Prozess des Regelns zum Ziel, den Zustand eines Systems an einen definierten Zielzustand anzugleichen:

- „Das Regeln, die Regelung, ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße, erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. [DIN19226]“

Der Begriff *Regeln* bezeichnet einen Vorgang, bei dem fortlaufend eine zu regelnde Größe (IST) erfasst und mit einer anderen Größe, der Führungsgröße (SOLL), verglichen wird. Auf Basis des Vergleichsergebnisses können beide Größen durch geeignete Maßnahmen einander angeglichen werden. Ein zentrales Element des Regelns ist demnach das Erfassen oder Messen der Regelgröße, bzw. die oben genannte *Ist-Aufnahme*. Dabei kommen elementare Methoden der Messtechnik zum Einsatz.

#### 2.4.4 Messtechnik

Das Einmessen von Referenzen ist ein unmittelbarer Bestandteil jeder Ist-Aufnahme und somit für jeden Soll/Ist-Vergleich erforderlich. Die Güte des Einmessens hat direkten Einfluss auf die Genauigkeit des Vergleichsergebnisses, weshalb es nahe liegt, zur Lösungsfindung auf das im Folgenden vorgestellte Grundlagenwissen aus der Domäne der Messtechnik zurückzugreifen. Weiterhin ist die Genauigkeit der Registrierung von virtueller und realer Welt von entscheidender Bedeutung für die Akzeptanz und Nutzbarkeit eines AR-Systems [PBDM07]. Da auf Basis von Vergleichsergebnissen Planungsentscheidungen über Neu- oder Umbau von Fertigungsbereichen oder ganzen Fabriken getroffen werden, müssen diese verlässlich sein. Dies erfordert genaue Eingangsdaten durch geeignete Hardware und Software, welche die Messtechnik zur Verfügung stellt.

##### 2.4.4.1 Grundlagen

Das Messen dient der quantitativen Bestimmung einer unbekanntes Größe eines Objekts. Grundsätzlich ist jeder Messwert mit einer Unsicherheit belastet, da es sich bei einer Vermessung um eine Transformationsoperation handelt, in die neben der realen Messgröße auch Umgebungsbedingungen und Messfehler einfließen (vgl. Abbildung 2-19).

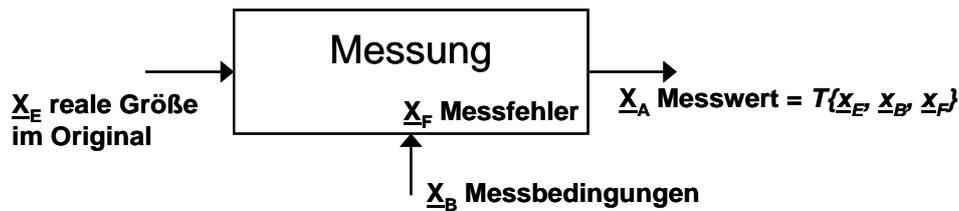


Abbildung 2-19: Messen als Transformationsoperation [Mah00]

#### 2.4.4.2 Definitionen

Die nachfolgend genannten Begriffsdefinitionen sind der deutschen Norm der Messtechnik [DIN1319] entnommen.

- Die *Einflussgröße* ist nicht Gegenstand der Messung, beeinflusst jedoch die Messgröße oder die von der Messeinrichtung gelieferte Information über den Messwert.
- Die *Messmethode* beschreibt im Speziellen die vom Messprinzip unabhängige Art des Vorgehens bei der Messung. Bekannte Messmethoden sind die *Direkte* und die *Indirekte Methode*. Messungen nach der *Direkten Methode* ermöglichen ein unmittelbares Ablesen des Messergebnisses (Ausschlags-Messmethode, Nullabgleichs-Messmethode). Bei *indirekten Messmethoden* liegt das Resultat erst nach einigen Zwischenstufen vor (Differenz-Messmethode).
- Das *Messprinzip* beschreibt die physikalische Grundlage eines Messverfahrens (z.B. die Lorentzkraft als Grundlage einer Messung der elektrischen Stromstärke).
- Die *Messunsicherheit* des Schätzwertes einer physikalischen Größe grenzt einen Wertebereich ein, innerhalb dessen der wahre Wert der Messgröße liegt. Eine Wahrscheinlichkeit dazu ist nicht bestimmbar. Die Messunsicherheit ist ein positiver Wert.
- *Messverfahren* beschreiben konkret die praktische Anwendung eines Messprinzips und einer Messmethode.
- Eine *Messeinrichtung* ist die Gesamtheit aller Messgeräte und zusätzlicher Einrichtungen zur Erzielung eines Messergebnisses.
- *Kalibrieren* ist das Ermitteln des Zusammenhangs zwischen Messwert oder Erwartungswert der Ausgangsgröße und dem zugehörigen wahren oder richtigen Wert der als Eingangsgröße vorliegenden Messgröße für eine betrachtete Messeinrichtung bei vorgegebenen Bedingungen. Bei der Kalibrierung erfolgt kein Eingriff, der das Messgerät verändert.

### 2.4.4.3 Allgemeiner Messvorgang

Das Durchführen einer Messung erfolgt unabhängig von dem gewählten Messmitteln oder -methoden nach dem in Abbildung 2-20 dargestellten allgemeinem Schema.

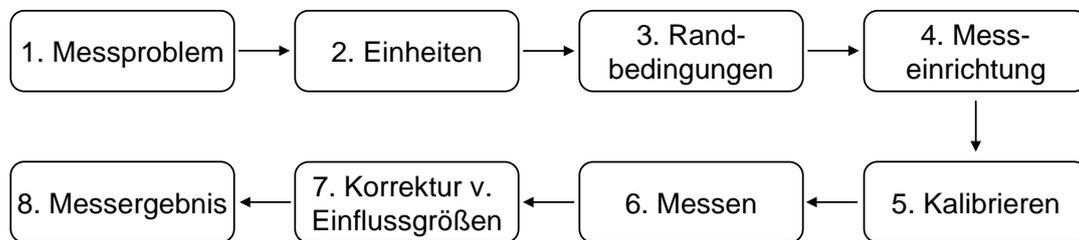


Abbildung 2-20: Allgemeiner Messvorgang [eigener Entwurf]

Die Lösung einer Messaufgabe beginnt mit der Definition des Messproblems. Dabei werden die Messaufgabe, das Messobjekt und die physikalische Messgröße festgelegt. Im Anschluss wird die Maßeinheit des Messergebnisses entsprechend der zu messenden physikalischen Eigenschaft festgelegt. Es ist zu beachten, dass einige Werte von dimensional Größen wie z.B. Winkel, Brechzahl oder Anzahl ohne Einheiten angegeben werden. Da Umgebungsbedingungen (Temperatur, Druck, etc.) die Messung beeinflussen können, werden notwendige Randbedingungen aufgestellt. Ausgehend vom Messprinzip und der Messmethode wird ein Messverfahren entwickelt, das in einer Messeinrichtung verwirklicht wird. Für die meisten bekannten Messaufgaben existieren fertige Messgeräte.

Um ein rekonstruierbare Messung eines genormten Wertes sicherzustellen, ist die Messeinrichtung in regelmäßigen Abständen, bestenfalls vor jedem Messvorgang, zu kalibrieren. Dabei wird der Messwert bei einem als richtig anzusehenden Wert der Eingangsgröße ermittelt. Falls der Messwert nicht mit dem Wert der Messgröße innerhalb vorgegebener Fehlergrenzen übereinstimmt, ist das Gerät neu zu justieren (einzustellen). Das Messen kann einmalig oder wiederholt unter denselben Bedingungen durchgeführt werden. Im zweiten Fall sind Mittelwert und Standardabweichung zu berechnen. Bei einer indirekten Methode können Messungen verschiedener Größen erforderlich sein, aus denen der Messwert der gesuchten Größe nach festgelegten mathematischen Beziehungen zu berechnen ist. Sofern Einflussgrößen und deren Auswirkungen bekannt sind werden daraus resultierende systematische Messabweichungen korrigiert. Zum Abschluss wird das vollständige Messergebnis ermittelt. Dieses besteht aus dem Messwert (gegebenenfalls Mittelwert aus einer oder mehreren Messreihen oder dem berechneten Wert bei einer indirekten Messmethode), ergänzt durch quantitative Aussagen zur Messunsicherheit.

### 2.4.5 Registrierungsmethoden

Im Allgemeinen bedeutet Registrierung die Ausrichtung von Datensätzen zueinander. Im Speziellen findet bei der hier gemeinten Registrierung eine Koordinatentransformation statt. Die Ansätze zur Lösung des Registrierungsproblems sind stark von der Art des gegebenen Koordinatenformats und der konkreten Anwendung abhängig. Tabelle 2-3 zeigt einige Lösungsbeispiele für das Registrierungsproblem in Augmented Reality Anwendungen.

Tabelle 2-3: Übersicht Registrierungsproblem bei Augmented Reality, nach [Pen08]

Registrierungsproblem	Koordinatenformat	Anwendung
Registrierung von zwei Bildern	2D – 2D	Feature Tracking
Registrierung von Bild zu 3D-Model	2D – 3D	Marker Tracking
Offset bei Durchsichtbildschirmen	2D – 3D	See – Through Kalibrierung
Koordinatensystemtransformation	3D – 3D	Registrierung durch Passpunkte
Transf. zw. zwei Trackingsystemen	6D – 6D	Target – Kamera – Kalibrierung

Die Ursachen für verschiedenartige Koordinatenformate sind unterschiedliche Positionen während der Datenaufnahme, asynchron erfasste Datensätze, verschiedene Sensoren zur Datenerfassung oder unterschiedliche Dimensionen von Datensätzen [ZF03]. Unabhängig von dem konkreten Registrierungsproblem ist es stets das Ziel, eine Transformation zu berechnen, welche die Werte eines Koordinatenformats in einem Zielformat abbildet. Nach Zito und Flusser arbeitet die Mehrheit aller Bildregistrierungsalgorithmen nach einem vierstufigen Muster [ZF03]:

1. Merkmalerkennung: Erkennung von markanten Objekten (Features) in den Daten
2. Feature Matching: Einrichtung von Korrespondenzen zwischen den erkannten Merkmalen
3. Näherungsweise Berechnung des Transformationsmodells: Berechnung der Transformationsparameter basierend auf den korrespondierenden Merkmalen
4. Datentransformation: Abbildung des kompletten Datensatzes im Zielkoordinatensystem auf Basis des errechneten Transformationsmodells.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Registrierungsansätze auf Basis der Ausführungen in [Pen08] zusammengefasst.

### 2.4.5.1 2D-2D Bildregistrierung

Das Registrieren von Bildern zueinander findet bei zahlreichen Anwendungen in den Bereichen medizinische Bildverarbeitung, Computer Vision und Tracking statt. Aufgrund der Vielfalt von Bildformaten und deren unterschiedlichen Komprimierungsarten gibt es keine universelle Methode für eine allgemeine Bildregistrierung. Ein Beispielszenario für die 2D-2D-Bildregistrierung ist in Abbildung 2-21 dargestellt.

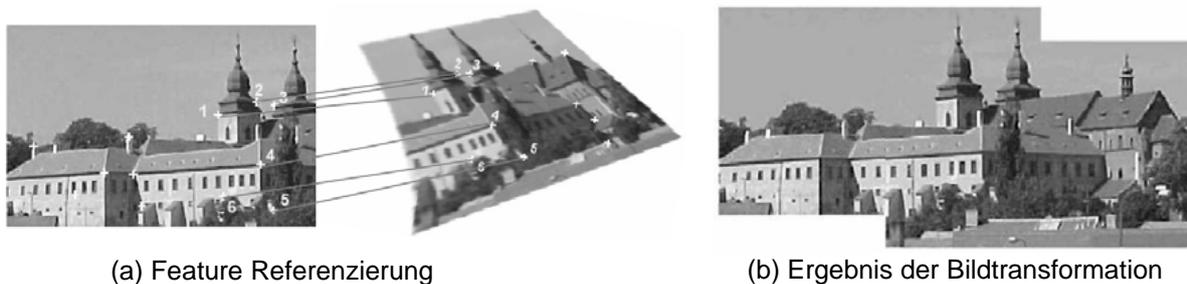


Abbildung 2-21: 2D-2D Bildregistrierung (nach [ZF03])

#### Featureerkennung

Das Identifizieren und Kennzeichnen von Features erfolgt manuell durch den Anwender, automatisch über Bildverarbeitungsalgorithmen oder auf Basis eines hybriden Ansatzes aus beiden Methoden. Dazu werden verschiedene Arten von Features wie Linien [ZT98] oder Punkte differenziert [ZWT99].

#### Featurereferenzierung

Zur Zuordnung erkannter Features zueinander existieren in der Literatur verschiedene Methoden, wie Farbverlaufgradienten (z.B. Grauwerte), räumliche Verteilung oder funktionale Beschreibungen. Ein weiterer Ansatz ist das so genannte Bereichsmatching, das keine speziellen Features sondern ganze Bildbereiche einander zuordnet. Hierzu werden Bildausschnitte von vordefinierter Größe auf Korrespondenz geprüft. Ein klassisches Beispiel ist die Methode der Kreuzkorrelation, welche Farbintensitäten der definierten Bildbereiche abgleicht [Pra91].

#### Erstellen des Transformationsmodells

Das Erstellen des Transformationsmodells zur Umrechnung der erkannten Korrespondenzen teilt sich in zwei Schritte: die Auswahl einer Transformationsfunktion und ihre Parameterschätzung. Die Transformationsfunktion wird entsprechend der Eigenschaften des Bilddatenformats gewählt und verfolgt das Ziel, dass zwei korrespondierende Merkmale nach der Transformation so nah wie möglich beieinander liegen. Beispiele hierfür sind starre Transformationen, die eine globale Umrechnung durchführen (starre Ähnlichkeitstransformation,

affine Transformationen, sowie das perspektivische Projektionsmodell [HZ03]) oder nicht-starre Funktionen, die Objektverformungen berücksichtigen (Elastische oder Optical-Flow-Registrierung [BB95]).

### Transformation

Auf Basis des Transformationsmodells werden die beiden Bilddatensätze zueinander ausgerichtet. Dazu wird entweder eine Vorwärts- oder Rückwärtstransformation durchgeführt. Die Vorwärtstransformation berechnet für jeden Pixel die korrespondierende Position im Koordinatenraum des Zielbildes. Bei dieser Methode können im berechneten Bild jedoch Lücken oder Überschneidungen entstehen. Im Gegensatz dazu nutzt die häufiger angewendete Methode der Rückwärtstransformation ein Raster von Punkten im Ergebnisbild, auf welches die invertierte Transformationsfunktion angewendet wird. Eine zusätzlich angewendete Interpolationsfunktion verhindert Löcher oder Überlappungen [LGK99].

#### 2.4.5.2 3D-3D Punktregistrierung

Beim Problem der 3D-3D-Registrierung wird die Transformation von zwei Punktmengen im 3D-Raum bestimmt. Abbildung 2-22 stellt diesen Prozess grafisch dar.

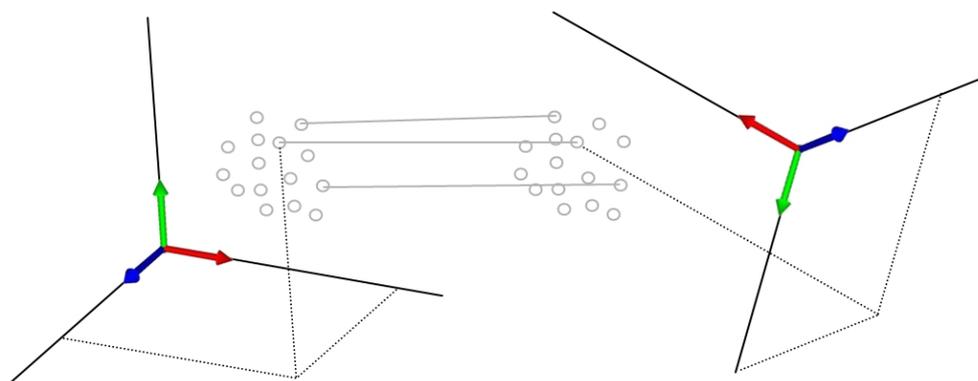


Abbildung 2-22: 3D-3D Registrierung einer Punktwolke [Pen08]

### Featureerkennung

Die Quelle von Merkmalen im 3D-Raum ist ein virtuelles oder reales Objektmodell, das durch Ecken, Kanten und Flächen definiert wird. Als Featureelemente stehen somit Schnittpunkte, Linien oder Flächen zur Verfügung, die sich alle durch 3D-Punkte beschreiben lassen. Das Identifizieren von Featureelementen ist demnach die Selektion einer Teilmenge von bekannten Punkten des Objektmodells. Dies kann manuell durch den Anwender oder automatisch per Zufallsalgorithmus oder auf Basis von vordefinierten Eigenschaften durchgeführt werden. Im letzteren Fall ist es erstrebenswert, relevante Strukturen als identifizierbare

Eigenschaften zu definieren, welche mit hoher Sicherheit bei der jeweiligen Aufgabe vorkommen. Ein Beispiel für eine automatisierte 3D-Featureerkennung präsentieren Platonow und Langer [PL07], deren Algorithmus auf Basis von polygonalen CAD-Daten ein Konturmodell erzeugt. Dadurch werden Kanten identifiziert, die sich als Trackingfeatures nutzen lassen.

### **Erstellen des Transformationsmodells**

Das Referenzieren von Featurepunkten aus zwei Datensätzen erfolgt entweder auf Basis von bekannten oder unbekanntem Korrespondenzen. Bekannte Korrespondenzen ergeben sich aus dem Anwendungsszenario (z.B. durch Einmessen über definierte Passpunkte) oder durch manuelle Identifikation korrespondierender Featurepunkte. Der Fall von unbekanntem Korrespondenzen ist in der Literatur als „simultaneous pose and correspondence problem“ (SPC) bekannt [Pen08], wird aber im Rahmen dieser Arbeit nicht genutzt und daher nicht weiter betrachtet.

Mithilfe von bekannten 3D-Punktkorrespondenzen lässt sich ein lineares Gleichungssystem erstellen, das die beiden Punktwolken und deren Transformation ineinander beschreibt. In der Literatur sind verschiedene mathematische Verfahren zur Lösung linearer Gleichungssysteme mit unterschiedlichen Randbedingungen bekannt. Ein allgemeiner Ansatz ist die Methode der kleinsten Fehlerquadrate, wobei eine Transformation von zwei Datensätzen derart bestimmt wird, dass die Summe der quadratischen Abweichungen zu Punkten der Zielfunktion - die so genannten Residuen - minimiert werden. Im Fall von zwei Punktwolken entsprechen die Residuen den Fehlern zwischen zwei korrespondierenden Referenzpunkten nach der Anwendung des Transformationsmodells. Da die Residuen einen direkt proportionalen Zusammenhang zur euklidischen Distanz der beiden Punkte haben, eignet sich diese Methode sehr gut zur Transformation von Punktwolken. Ein bekannter Ansatz zur Lösung von Problemen mit kleinsten Fehlerquadraten ist die Anwendung der Singularitätswertzerlegung [HZ03].

Weitere Methoden zur Lösung linearer und nicht-linearer Optimierungsprobleme (z. B. Minimierungsprobleme) sind iterative Näherungsverfahren. Dabei werden die Gleichungsparameter iterativ so verändert, dass die näherungsweise berechneten Lösungen sukzessive verfeinert werden bis der Fehler des Näherungswertes unter einen vordefinierten Schwellenwert fällt. Bekannte Näherungsverfahren sind beispielsweise das Newton- oder das Gauss-Newtonverfahren, das Gradientenverfahren, sowie der Levenberg-Marquardt-Algorithmus, welcher das Gauss-Newtonverfahren mit der Gradientenmethode kombiniert [HZ03].

### Transformation

Die Transformation eines Datensatzes in das Koordinatensystem des korrespondierenden Datensatzes kann vorwärts und rückwärts erfolgen. Da die Transformationsmatrix eine reguläre, quadratische Matrix der Dimension  $4 \times 4$  ist, kann sie invertiert und zur Transformation in beide Richtungen angewendet werden.

#### 2.4.5.3 2D-3D Punktregistrierung

Die 2D-3D-Punktregistrierung beschreibt die Transformation der Koordinaten von Punkten im 3D-Raum auf 2D-Punkte in einem Bildkoordinatensystem (vgl. Abbildung 2-23).

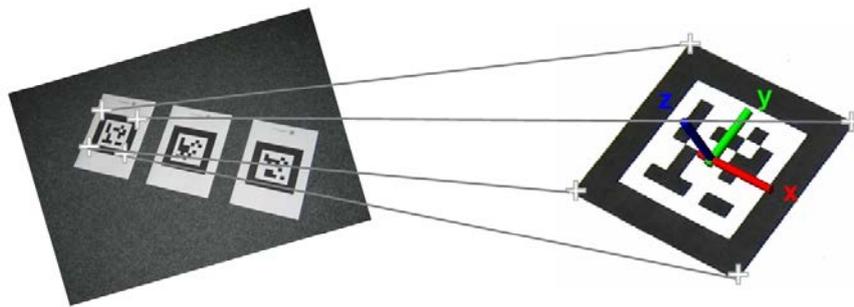


Abbildung 2-23: 2D-3D Registrierung [Pen08]

### Featureerkennung

Für die 2D-3D-Registrierung ist das Erkennen korrespondierender Featureelemente sowohl im 2D- als auch im 3D-Datensatz erforderlich. Dies erfolgt analog zu den oben beschriebenen Ansätzen für die 2D-2D- und 3D-3D-Registrierung (vgl. 2.4.5.1 und 2.4.5.2).

### Featurereferenzierung

Wie im Fall der 3D-3D-Registrierung ist für eine erfolgreiche 2D-3D-Referenzierung das Wissen über korrespondierende Featureelemente notwendig. Unbekannte Korrespondenzen erfordern die Lösung eines SPC-Problems, das in dieser Arbeit nicht verwendet wird.

### Erstellen des Transformationsmodells

Die gesuchte Transformation beschreibt die perspektivische Projektion von Punkten aus dem 3D-Raum auf eine zweidimensionale Bildebene und beinhaltet eine Koordinatentransformation zwischen dem Koordinatensystem des 3D-Modells und dem Kamerakoordinatensystem. Nach dem Prinzip der Lochkamera<sup>5</sup> ist die Transformation linear und kann mit Methoden zur Lösung linearer Gleichungssysteme ermittelt werden. Die realen

---

<sup>5</sup> Das Modell der Lochkamera bildet 3D-Raumpunkte linear auf einer Bildebene ab, wobei sich alle Linien vom Raumpunkt zum korrespondierenden Punkt auf der Bildebene in einem Projektionszentrum schneiden [HZ03].

Bilddaten unterliegen jedoch den nicht-linearen Einflussfaktoren optischer Verzeichnungen des Kameraobjektives [Luh03]. Im Rahmen des Transformationsmodells lassen sich diese Verzeichnungen durch ein nicht-lineares Gleichungssystem beschreiben, welches mit Hilfe der oben genannten iterativen Näherungsverfahren gelöst werden kann (vgl. S. 47). Das Transformationsmodell beinhaltet somit die Projektionsmatrix und eine Transformationsmatrix. Je nach Anwendungsszenario können einige Parameter des Transformationsmodells bereits bekannt sein. Das Markertracking beinhaltet beispielsweise eine 2D-3D-Registrierung mit bekannter Projektionsmatrix, so dass dabei nur die Transformationsmatrix bestimmt wird [KB99]. Im Gegensatz dazu werden bei einer Kamerakalibrierung sowohl Projektions- als auch Transformationsmatrix berechnet (vgl. AICON 3D Studio [God02]).

### **Transformation**

Das Transformationsmodell wird entsprechend der jeweiligen Anwendung eingesetzt. Im Fall des Markertrackings wird es genutzt, um das virtuelle 3D-Modell entsprechend der Pose der genutzten Kamera zu positionieren. Mit bekannter Projektionsmatrix kann eine Bildkorrektur durchgeführt werden, indem das Bild auf Basis der berechneten Verzeichnungsparameter durch eine Transformation der Bildpixel entzerrt wird.

#### **2.4.5.4 6D-6D Registrierung**

Eine 6D-6D Registrierung beschreibt die Bestimmung einer Koordinatensystemtransformation auf Basis von Datensätzen mit korrespondierenden 6-DOF-Transformationen. Das bedeutet für die Geometrielemente in den Datensätzen ist nicht nur deren Position (translatorische Freiheitsgrade) sondern auch deren Orientierung (rotatorische Freiheitsgrade) bekannt.

### **Featureerkennung**

Im Rahmen von AR-Anwendungen, entsprechen diese 6-DOF Datensätze entweder den Messwerten der eingesetzten Trackingsysteme, oder sie stehen als Ergebnisse eines vorangegangenen Registrierungsprozesses (z.B. 2D-3D-Registrierung beim Markertracking) zur Verfügung.

### **Featurereferenzierung**

Ein bewährter Ansatz zum Mappen von 6-DOF-Posen ist die Verwendung von Zeitstempeln, mit denen jeder Datensatz zum Zeitpunkt der Datenerfassung gekennzeichnet wird. So können korrespondierende Datensätze im Nachgang durch ihre übereinstimmende Aufnahmezeit identifiziert werden. Dabei ist zu beachten, dass die beteiligten Trackingsysteme synchronisierte Zeitstempel verwenden. Andernfalls sind die Datensätze nicht direkt vergleichbar, was Registrierungsfehler nach sich zieht.

### **Erstellen des Transformationsmodells**

Das Transformationsmodell ist eine Transformationsmatrix, welche die Paare aus den 6-DOF-Posen zu einander abbildet. Der funktionale Zusammenhang ist eine einfache, lineare Matrixmultiplikation und kann mit Hilfe der oben bereits vorgestellten Algorithmen ermittelt werden.

### **Transformation**

Die Transformation ist ebenso wie die 3D-3D Transformation invertierbar und erlaubt sowohl Vorwärts- als und Rückwärtstransformation.

#### **2.4.5.5 Fazit**

Für eine kongruente Überlagerung von Betriebsmitteln im Kamerabild ist ein 2D-3D Koordinatentransformation erforderlich. Daraus ließe sich ableiten, dass für den Anwendungsfall des Soll/Ist-Vergleichs von Betriebsmitteln lediglich die Betrachtung der 2D-3D Registrierung erforderlich ist. Dies ist jedoch nur dann korrekt, wenn die zur Visualisierung eingesetzte Kamera gleichzeitig dem Tracking- bzw. Erfassungssystem entspricht. Kommen alternative Trackingsysteme zum Einsatz, so sind auch 3D-3D-Registrierungen oder 6D-6D-Registrierungen relevant.

## 3 Stand der Technik

### 3.1 Soll/Ist-Vergleiche heute

Heutzutage beziehen sich geometrische Soll/Ist-Vergleiche im Rahmen der Automobilfertigung in der Regel eher auf das Produkt als auf Betriebsmittel. Sie werden im Rahmen der Qualitätssicherung ab dem Produktionsanlauf durchgeführt und ordnen sich zeitlich nach der Planungsphase in den Produktentstehungsprozess ein. Bis zum Erreichen der angestrebten Produktqualität sind kosten- und zeitintensive Optimierungsarbeiten durchzuführen.

Das Potenzial zur Steigerung der Planungsqualität durch Soll/Ist-Vergleiche im Vorfeld einer Planungsmaßnahme (Abbildung 3-1) wurde bereits in zahlreichen Arbeiten identifiziert [Bad06, GSB+07, Sch08]. Hierdurch ließen sich Abweichungen zwischen der Realität und den Modellen der Digitalen Fabrik frühzeitig erkennen, so dass sie bei der Planung berücksichtigt werden können. Wesentliches Ziel ist es Änderungen in der Planung so früh wie möglich durchzuführen, da der Aufwand in der Regel umso größer ist, je später eine Änderung vorgenommen wird [Bul95].

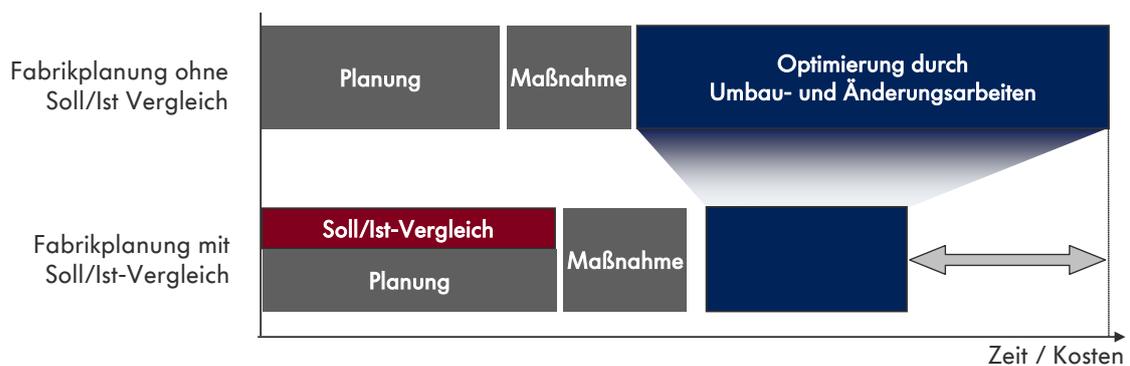


Abbildung 3-1: Potenzial von Soll/Ist-Vergleichen beim Planungsprozess [eigener Entwurf]

Abbildung 3-1 illustriert schematisch das Potenzial, welches Soll/Ist-Vergleiche im Rahmen von Planungsmaßnahmen bieten. Der Optimierungsaufwand nach einer Maßnahme wird deutlich reduziert. Der spätere Nutzen des Soll/Ist-Vergleichs erfordert zusätzlichen Aufwand in der frühen Planungsphase, welcher durch die Ist-Aufnahme der Realität verursacht wird. Je nach Anwendungsfall und Erfassungstechnologie ist dieser Aufwand unterschiedlich hoch ausgeprägt [Jur04]. In Einzelfällen kann der Aufwand den Nutzen übersteigen oder er

amortisiert sich erst sehr viel später bei einer Wiederverwendung im nächstem bzw. übernächstem Planungsprojekt [FS09]. Daher sind Soll/Ist-Vergleiche heute eher eine Ausnahme als die Regel. Eine weitere Ursache für die niedrige Durchdringung des Planungsalltags mit Soll/Ist-Vergleichen liegt in der Organisationsstruktur produzierender Unternehmen begründet. Produktprojekte werden aufgrund ihrer Komplexität von mehreren Fachbereichen abgewickelt, so dass einzelne Prozesse, die sich aus betriebswirtschaftlicher Sicht positiv auf nachgelagerte Fachbereiche und auch positiv auf das Projekt insgesamt auswirken können, in den ausführenden Fachbereichen Kosten verursachen. Klassisches Bereichsdenken [NEK94] führt in diesem Fall zu einer niedrigen Akzeptanz in den ausführenden Fachbereichen.

Werden in einzelnen Fällen Soll/Ist-Vergleiche im Rahmen einer Planungsvorbereitung durchgeführt, kommen für die Datenaufnahme in der Industrie derzeit folgende Verfahren zum Einsatz: Das Handaufmaß, die Tachymetrie, die Photogrammetrie sowie seit einigen Jahren auch das Laserscannen.

Jedes Messverfahren nutzt andere Werkzeuge und umfasst verschiedene Arbeitsschritte bei der Vorbereitung, Punkterfassung, Nachbereitung, sowie der Dokumentation von Vermessungsergebnissen. Weiterhin existieren diverse Möglichkeiten zur Bildung eines Modells auf Basis der gemessenen Daten. Es gibt vereinzelt Möglichkeiten zur Automatisierung der Vermessungsabläufe. Die genannten Vermessungsmethoden führen zu Ergebnissen mit unterschiedlichen Genauigkeiten und sind im Folgenden ausführlicher beschrieben. Die hier vorgestellte Ausarbeitung zu Vermessungsmethoden basiert im Wesentlichen auf den Ausführungen in [Wef02]. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden sind in [Sch01] tabellarisch zusammengestellt.

#### **3.1.1 Handaufmaß**

Beim Handaufmaß werden mittels einfacher Messwerkzeuge wie Bandmaß oder elektronischem Distanzmesser, Winkelprisma, Fluchtstab, Schnurlot, Wasserwaage, Hand-Winkelmesser und Winkelprisma charakteristische Objektpunkte durch direkte Messung in eine geometrische Beziehung zueinander gebracht. Die Datenerfassung erfolgt dabei nach den gleichen Regeln, die später bei der zeichnerischen Darstellung des Objektes angewendet werden: Mittels (rechter) Winkel und Streckenmessung wird ein Grundsystem aufgebaut, das nach und nach weiter verdichtet wird.

Je nach Umfang der Vermessung werden die Phasen des Aufbaus eines Grundsystems und der Detailvermessung voneinander getrennt. Die Dokumentation der Messwerte kann hierbei entweder in Form einer unmaßstäblichen Skizze mit Maß- und (Recht-)Winkelangaben oder direkt als maßstäbliche Zeichnung erfolgen. Die direkte maßstäbliche Zeichnung bietet die Möglichkeit der porträtierenden Zeichnung von Details [Mad01]. Bei der Datenerfassung in Form einer unmaßstäblichen Skizze erfolgt die Weiterverarbeitung durch Kartierung auf reproduzierbaren Materialien oder durch Bearbeitung in einem CAD-System.

Werden statt mechanischer Streckenmessgeräte registrierende, elektrooptische Geräte wie z.B. der DISTO der Firma Leica-Geosystems in Verbindung mit einem Notebook eingesetzt, so können direkt vor Ort CAD-Zeichnungen entstehen, die eine Vollständigkeits- und Plausibilitätsprüfung erlauben.

Die absolute geometrische Genauigkeit dieser Methode hängt stark von der Ausdehnung des Objektes ab und liegt im Millimeter bis Zentimeterbereich. Die Nachbargenauigkeit einzelner Details kann dabei wesentlich höher sein und hängt in entscheidendem Maße von der Fähigkeit und der Erfahrung des Messenden ab. Der Vorteil liegt neben den geringen Kosten für die Messwerkzeuge im engen Kontakt des Messenden zum Objekt. Der Vermesser ist während der Messung in der Lage, das Objekt mit allen Sinnen zu erfahren und zu „begreifen“. Nachteile liegen in der Automationsunfreundlichkeit, den Lücken in der automatischen Datenverarbeitung und der ungünstigen Fehlerfortpflanzung dieser Methode. Nachteilig ist auch, dass alle Messpunkte zugänglich sein müssen.

### **3.1.2 Tachymetrie**

Bei der Tachymetrie handelt es sich um ein Vermessungsverfahren, bei dem die Objektpunkte durch polare Richtungs- und Entfernungsmessung mit einem Vermessungsinstrument (Tachymeter) bestimmt werden. Tachymeter bzw. Totalstationen sind Winkelmessinstrumente mit elektronischem Abgriff der Horizontalrichtung und des Vertikalwinkels und der Möglichkeit, Strecken auf elektrooptische Weise zu messen. Durch die drei Bestimmungselemente (zwei Winkel, eine Strecke) können die kartesischen Koordinaten des Punktes berechnet werden. Diese Raumkoordinaten beziehen sich primär auf den jeweiligen Standpunkt und die Orientierung des Tachymeters (lokales System). Durch Messung zu bekannten Anschlusspunkten eines übergeordneten Systems können die lokalen Raumkoordinaten in Koordinaten dieses Systems transformiert werden.

Dieses Vermessungsverfahren beruht auf der langen Tradition der polaren Vermessung mit Theodoliten und optisch / mechanischer Streckenmessung, die sich seit Anfang der siebziger Jahre durch die Integration elektronischer Entfernungsmesser in das Vermessungsinstrument zum Standard-Aufnahmeverfahren im Vermessungswesen entwickelt hat. Benötigten die früheren Tachymeter für die Entfernungsmessung ein Reflektorprisma, das im Zielpunkt aufgehoben wurde, so ist es seit Mitte der neunziger Jahre auch möglich, Strecken bis etwa 200 m ohne Reflektorprisma mit geodätischer Genauigkeit zu messen [Zei99]. Dies erlaubt es, auch unzugängliche Punkte auf einfache Weise zu bestimmen. Da die Messwerte in digitalisierter Form vorliegen, können diese auf einfache Weise abgespeichert und weiterverarbeitet werden. Die Weiterverarbeitung kann entweder im Vermessungsgerät selbst oder in angeschlossenen Geräten erfolgen. Mit Hilfe entsprechender Berechnungs-, Zeichen- und Konstruktionsprogramme können die Messwerte unter Beibehaltung eines geschlossenen Datenflusses in Zeichnungen und Modelle umgesetzt werden.

Die Vorteile der Tachymetrie liegen in der außerordentlichen Flexibilität, der sehr hohen absoluten Genauigkeit auch bei ausgedehnten Objekten und im integrierten Datenfluß bis zum Endmodell. Die Nachteile liegen in den, verglichen mit dem Handaufmaß, höheren Anschaffungskosten für die technische Ausrüstung.

#### **3.1.3 Laserscannen**

Laserscanner, die den Vermessungsingenieuren seit ca. 1994 zur Verfügung stehen, messen ähnlich wie Tachymeter Richtungen und Strecken zu Objektpunkten [Jur04]. Im Unterschied zur Tachymetrie werden allerdings keine ausgesuchten einzelnen Punkte bestimmt, sondern eine (zunächst nicht orientierte) Punktwolke. Die typische Punktwolke eines 360°-Scans beinhaltet mehr als 1 Mio. Punkte und benötigt zur Aufnahme nur wenige Minuten. Ähnlich wie bei der Tachymetrie können auch hier die einzelnen Standpunktsysteme z.B. durch das Scannen bekannter Zielmarken oder Zielkörper miteinander verknüpft werden.

Bei der Weiterverarbeitung der Messwerte werden aus der Punktwolke teilautomatisch entweder (ausgleichende) Regelkörper extrahiert oder es erfolgt eine Oberflächengenerierung durch Dreiecksvermaschung der Messpunkte. Neben den Richtungen und Strecken können auch radiometrische Informationen der gemessenen Punkte registriert werden. Das Funktionsprinzip und die Anwendungsmöglichkeiten des Laserscannens sind ausführlich in [Ker03] beschrieben.

Die Vorteile dieser Methode sind die schnelle Arbeitsweise bei der örtlichen Aufnahme und die ungeheure Anzahl an Informationen, die in kürzester Zeit zu Stande kommt. Durch die große Anzahl der gemessenen Punkte können insbesondere unregelmäßige Formen sehr gut erfasst werden. Die unselektierten Informationen können zu einem späteren Zeitpunkt auch unter anderen Gesichtspunkten ausgewertet werden als ursprünglich angedacht. Der Nachteil ist, neben dem sehr hohen Anschaffungspreis und der Unhandlichkeit der Geräte, die aufwendige Nachbereitung der Daten, um daraus die typischen Vermessungsergebnisse wie Strichzeichnungen oder punkt-, linien-, flächen- und volumenbasierte 3D-Modelle zu generieren.

### **3.1.4 Photogrammetrie**

Bei diesem Verfahren werden Punkte, Linien und Flächen von Objekten durch Messungen in Fotos bestimmt. Es nutzt die Regeln der projektiven Geometrie: Sind der Kamerastandpunkt, die Kameraorientierung und das Abbildungsverhalten einer Kamera bekannt, so ist es möglich, ein Objekt durch Messung in zwei Fotos, die aus unterschiedlichen Positionen aufgenommen wurden, durch Strahlenschnitte zu rekonstruieren. Unter Verwendung tachymetrisch bestimmter Passpunkte ist es möglich, Teilmodelle des Objektes miteinander zu verbinden und in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu überführen (Mehrbild-Photogrammetrie). Aus dem so entstehenden digitalen Modell lassen sich die verschiedensten Produkte ableiten. Eine andere Variante stellt die Einbild-Photogrammetrie dar: Nach den Regeln der projektiven Geometrie lassen sich projektiv verzerrte Ebenen mit Hilfe von vier bekannten Punkten entzerren. Auf diese Weise entstehen maßstäbliche Fotos von Ebenen des Objektes, die zu maßstäblichen Fotoplänen zusammengesetzt werden können. Diese können schon alleine ein Ergebnis der Vermessung darstellen. Sie können aber auch die Grundlage für eine zeichnerische Ausarbeitung sein. Sofern die Geometrie des abgebildeten Objektes sowie die Position und die Aufnahmerichtung der Kamera bekannt sind, kann ein Foto mit Hilfe der differentiellen Entzerrung so umgebildet werden, dass ein maßstäbliches Abbild des Objektes entsteht (Orthofoto). Die Vorteile der Photogrammetrie liegen in der sehr schnellen Informationsbeschaffung und in der bildlichen Dokumentation des Objektes. Ein weiterer Vorteil ist die Tatsache, dass die Fotos ggf. auch unter anderen Gesichtspunkten ausgewertet werden können als ursprünglich angestrebt. Von Nachteil ist die fehlende Möglichkeit von Plausibilitäts- und Vollständigkeitskontrollen vor Ort und die Forderung nach günstigen Schnitten, also Objektsichtbarkeit von verschiedenen Standpunkten aus. Eine umfassende Darstellung der Methoden der Photogrammetrischen Vermessung liefert Luhmann [Luh03].

### 3.2 Augmented Reality basierte Soll/Ist-Vergleiche

Das Potenzial der Augmented Reality Technologie als Werkzeug für Soll/Ist-Vergleiche wurde bereits in zahlreichen Arbeiten identifiziert [Doi03, Bad06, Teg06, PBDM07, GSB+07, Sch08]. In frühen Planungsphasen können durch die Überlagerung der realen Welt mit virtuellen Plandaten Soll/Ist-Zustände visuell verglichen, sowie Fehler und zu erledigende Arbeiten besser erkannt werden. Im Folgenden werden bekannte Arbeiten dazu chronologisch zusammengefasst.

#### 3.2.1 Verwandte Arbeiten

Nölle et al. untersuchten verschiedene Visualisierungstechniken, um Vergleichsdaten optimal durch Augmented Reality zu visualisieren [Nöl02, NK06]. Mit Hilfe von optischem Markertracking werden die Simulationsergebnisse von Crashtests auf reale, chrashgefahrene Bauteile überlagert, um so die Güte der Simulation zu bewerten.

Die Volkswagen AG arbeitet seit einigen Jahren an der Entwicklung eines AR-Planungssystems, welches sich für den industriellen Einsatz eignet [PBDM07]. Ausgangsbasis war eine mobile, videobasierte Lösung mit einem optischen Infrarottrackingsystem. Das System wurde sukzessive an die industriellen Anforderungen angepasst wurde, woraus ein fotobasiertes, stationäres AR-System hervorging, welches heute prototypisch eingesetzt wird. Dabei werden definiert platzierte oder vermessen optische Marker als Referenzen zur Registrierung eingesetzt.

Sauer et al. entwickelten am Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung AR-Systeme, um Montageprozesse mit Hilfe von AR-Annotationen zu unterstützen und das Arbeitsergebnis durch einen Abgleich mit einer aus dem CAD-Modell generierten Referenzgeometrie abzugleichen [SD07, ST07]. Die vorgestellten Systemvarianten visualisieren die AR-Szene sowohl auf einem Monitor als auch auf HMD-Systemen und nutzen zur Bestimmung der Kameraposition entweder optisches Markertracking oder eine fix montierte Kamera mit einmaliger Vermessung der Kamerapose.

Im Rahmen des *AVILUS*-Projekts entwickelten Scheer et al. ein System zum Augmented Reality gestützten Bauabgleich digitaler Planungsdaten mit realen Umgebungen [SM11]. Hierbei kommt ein mobiles System zum Einsatz, welches sich über einen Laserscanner kontinuierlich in einer Fabrikhalle referenziert. Voraussetzung hierfür ist die Ausrüstung der Halle mit entsprechenden Targets. Besonders Merkmal des Systems ist der verwendete

Renderer, welcher sehr große Datenmengen in Echtzeit visualisieren kann. Der Abgleich erfolgt manuell durch eine teiltransparente Darstellung virtueller Planungsobjekte im Videobild der Umgebung. Erkannte Abweichungen können als Annotation den 3D-Objekten angefügt und zusätzlich als Screenshots abgelegt werden.

Bei jedem der bis hier geschilderten Lösungen ist eine aufwendige Prozessvorbereitung erforderlich, um die AR-Systeme im Weltkoordinatensystem zu registrieren. Die exakte Registrierung des AR-Systems ist Grundvoraussetzung zur Durchführung AR-basierter Soll/Ist-Vergleiche im industriellen Umfeld. Nur so wird eine kongruente Überlagerung der virtuellen Objekte im Realbild sichergestellt, was das Erkennen von Abweichungen ermöglicht. Die genannten Arbeiten realisieren dies durch direkte Vermessung der Marker-/Target- oder Kamerapositionen [NK06, PBDM07, ST07, SM11] beziehungsweise durch permanente Montage der Kamera und definierter Positionierung des Trackingobjekts [SD07]. Zweiteres ist nur bei stationären AR-Arbeitsplätzen möglich.

Pentenrieder et al. zeigen im Rahmen einer Untersuchung zu Registrierungsvarianten, dass die Verwendung von Adaptern den nötigen Rüstaufwand zur Registrierung deutlich reduziert [PBR+08]. Dabei kommen Trackingtargets zum Einsatz, die sich durch mechanische Adapter schnell an bekannten Referenzpunkten in der Realität montieren lassen. Die referenzierten Punkte ermöglichen eine schnelle Registrierung ohne zusätzliches Vermessen.

Bemerkenswert ist ein 2007 vorgestelltes Gemeinschaftsprojekt der Universität München und der Siemens AG [GSB+07]. Hier wurde ein AR-System für Soll/Ist-Vergleiche von Fertigungsanlagen entwickelt, das ebenfalls als fotobasierte, stationäre Lösung umgesetzt ist. Anstelle von Markern/Targets werden jedoch fabrikspezifische Referenzgeometrien (Anchor-Plates) zum Tracken verwendet, die in den aufgenommenen Fotos identifiziert werden. Durch das Tracking über Anchor-Plates entfällt der manuelle Einmessvorgang von Referenzobjekten in der Produktionsumgebung. Obgleich die nachgelagerte Identifikation der Anchor-Plates in den Fotos noch nicht vollständig automatisiert abläuft, die Trackinggenauigkeit nicht dem des Markertrackings entspricht und nicht alle Arbeitsräume abgedeckt werden können, ist dieser Ansatz sehr beachtenswert. Das Vorgehen passt sich an die industriellen Gegebenheiten an und vermeidet somit hohen Rüstaufwand.

Der Großteil der präsentierten Lösungen für industrielle, AR-basierte Soll/Ist-Vergleich arbeitet fotobasiert. Vor-Ort- und Echtzeit-Visualisierungen sind selten. Häufig finden sich zeit- oder ortsversetzte, monitorbasierte Systeme. Dennoch wird dem AR-basierten Soll/Ist-Vergleich im industriellen Umfeld in allen aufgezählten Beispielen großes Potenzial

bescheinigt. In der Literatur finden sich jedoch nur verhältnismäßig wenige Projektberichte zu tatsächlich durchgeführten Soll/Ist-Vergleichen mit Hilfe der AR-Technologie. Das Überführen prototypischer Lösungen in produktive Anwendungen scheitert heute oft an der mangelnden Flexibilität der eingesetzten AR-Systeme [SKWS07] und der fehlenden Integration von Anwendern in den Systementwicklungsprozess [Cla09]. Als weitere Ursache wird die unzureichende Verfügbarkeit digitaler Planungsmodelle, welche Voraussetzung für einen solchen Vergleich sind, vermutet. Insgesamt kann festgestellt werden, dass folgende technische Einschränkungen die heutigen Demonstratoren limitieren.

- Mangel an geeigneten Trackingsystemen, die ohne hohen Rüstaufwand eine genaue Registrierung von realer und virtueller Industrieumgebung ermöglichen
- Komplexe Datenaufbereitung, wodurch die AR-Systeme nur Expertensysteme bleiben
- „Fehlerquelle Mensch“ durch großen manuellen Auswerteaufwand
- Rückführung von Vergleichsergebnissen (z.B. durch Geometrierekonstruktion)

#### 3.2.2 Handlungsbedarf

Neben den identifizierten technischen Einschränkungen existiert weiterer, anwendungs- bzw. prozessorientierter Handlungsbedarf. Abbildung 3-2 gibt einen thematischen Überblick zu den offenen Fragestellungen, die für eine erfolgreiche Integration von AR-basierten Soll/Ist-Vergleichen von Betriebsmitteln in den Planungsprozess beantwortet werden müssen.



Abbildung 3-2: Handlungsbedarf zu AR- Soll/Ist-Vergleichen in der Fertigungsplanung [eigener Entwurf]

Die **Registrierung in industrieller Umgebung** unterscheidet sich in ihren Anforderungen stark vom Registrierungsprozess in anderen Domänen. So kennzeichnen sich Produktionsumgebungen durch komplexe Objektstrukturen mit monotonen Texturen und gelegentlich auftretenden Symmetrien aus. Folglich lassen sich bildbasierte Verfahren mit featurebasierter

Objekterkennung nicht stabil einsetzen. Ferner sind bekannte Referenzobjekte durch Verbauung nicht immer frei zugänglich. Auch sind die Entfernungsunterschiede innerhalb des Anwendungsszenarios im Vergleich zu anderen Anwendungen enorm. So beträgt die Grundfläche einer Vorrichtung, deren Elemente auf Vollständigkeit geprüft werden sollen, nur zwei bis vier Quadratmeter. Beim Prüfen derselben Vorrichtung auf korrekte Positionierung innerhalb der Produktionshalle werden dagegen schnell Entfernungen von über 100 Metern erreicht. Für den AR-Bereich existieren bisher kaum **Large-Area-Trackingsysteme**, die mit vertretbarem Rüstaufwand ausreichend genaue Trackingergebnisse in derart großen Arbeitsräumen liefern. Eine besondere Herausforderung ist in diesem Zusammenhang die **optische Kalibrierung** des Erfassungssystems. Eine im Nahbereich kalibrierte Kamera liefert bei der Betrachtung entfernter Objekte unscharfe Bilder. Als Folge ergeben sich AR-Szenen mit stark unscharfem Realbildanteil und exakt gerendertem virtuellen Bildanteil.

Die Auswertung von AR-Szenen der oben genannten AR-Systeme ist ein arbeitsintensiver, manueller Prozess. Er ist nicht standardisiert und daher fehleranfällig. Bislang sind keine Untersuchungen zur **Informationswahrnehmung** bei der Auswertung von AR-Szenen zum Soll/Ist-Vergleich bekannt. Es ist nicht geklärt ob und welche Arten von Abweichungen durch die Anwender erkannt werden. Ebenso stellt sich die Frage, wie die verwendete Visualisierungstechnik das Erkennen von Abweichungen beeinflusst. Eine **automatisierte Auswertung** kann helfen Soll/Ist-Abweichungen vollständig zu erfassen und einheitliche Vergleichsergebnisse zu generieren.

Ebenfalls ist eine konkrete **Beschreibung des Prozesses** „AR-basierter Soll/Ist-Vergleich“ wichtig. Solange dieser Geschäftsprozess nach „Bauchgefühl“ durchgeführt wird, können weder Verlässlichkeit noch Wiederholbarkeit zugesichert werden. Die Fragen *was*, *wie* und *womit* verglichen werden soll, sind für diesen Prozess ebenso zu definieren, wie das angestrebte Vergleichsergebnis. Die Art der Weiterverarbeitung dieses Ergebnisses im Fertigungsplanungsprozess ist eine notwendige Frage zur organisatorischen **Prozessintegration**. Zu welchem Zeitpunkt im Planungsprozess ist die Durchführung von Soll/Ist-Vergleich überhaupt sinnvoll? Allein diese essentielle Fragestellung verdeutlicht den Handlungsbedarf bei der organisatorischen Einbindung in den gesamten Planungsprozess.

Ein weiterer organisatorischer und auch technischer Handlungsbedarf besteht bei der Verfügbarkeit geeigneter **Datenschnittstellen** zwischen den Systemen der Digitalen Fabrik. Die Modellerzeugung einzelner Fabrikbereiche scheitert oft am verlustfreien Zusammenführen von Teilmodellen in einem gemeinsamen Zielformat. Das Gesamtmodell ist dann zu

groß, um performant verarbeitet werden zu können. Weiterhin lassen sich beim Soll/Ist-Vergleich generierte Geometriedaten bisher nur mit hohem manuellen Aufwand in die Planungssysteme zurückführen. Neben der Herausforderung effizienter Datenschnittstellen, ist der Anwender mit der **Visualisierung großer Datenmengen** konfrontiert. Nur wenige Renderer ermöglichen das Anzeigen der Datenmenge komplexer Planungsprojekte in Echtzeit. Heute wird entweder großer Aufwand zur Reduzierung der Konstruktionsdaten betrieben, oder auf fotobasierte Auswertungen ohne Livevisualisierung zurückgegriffen.

Nach Tümler lassen sich die Forschungsaktivitäten zur Augmented Reality Technologie in die drei Themenbereiche Technik, Anwendungen und Nutzerzentrierung gliedern [Tüm09]. Zur Beantwortung der meisten, in Abbildung 3-2 aufgeführten, Fragestellungen ist jedoch eine Kombination dieser themenfokussierten Forschungsbereiche notwendig. So besteht nach wie vor großer Handlungsbedarf bei der Registrierung von AR-Systemen in realen Produktionsumgebungen. Dies ist eine technische Herausforderung. Obgleich es zahlreiche technische Lösungsansätze dazu gibt, die in Laborumgebungen durchaus praktikabel sind, ist der dafür notwendige Rüstaufwand in der realen Fabrikhalle oft ein wirtschaftliches K.O.-Kriterium. Unterschiedliche Anwendungsszenarien mit variierenden Prämissen (verfügbare Referenzobjekte, Objektgrößen und -entfernungen, Verfügbarkeiten, etc.) ermöglichen keine dedizierte technische Umsetzung, die für alle Anwendungsfälle das Optimum darstellt. Zum Finden einer optimal passenden Lösung ist demnach die Betrachtung technischer und anwendungsbezogener Fragestellungen notwendig.

Die Untersuchung dieser Fragestellungen erfordert ein geeignetes AR-System, mit dem praxisnahe Versuche möglich sind. Hierzu ist keine vollständige Eigenentwicklung notwendig. Am Markt sind verschiedene Softwarelösungen zur Entwicklung von AR-Systemen vorhanden, aus denen im folgenden Abschnitt das am besten geeignete ausgewählt wird.

#### **3.2.3 Marktübersicht Augmented Reality Systeme**

Zum heutigen Zeitpunkt existieren zahlreiche Softwarepakete zur Entwicklung von AR-Anwendungen. Einige davon stehen als Freeware zur Verfügung, andere sind kommerziell beziehbar. Mit den existierenden Systemen ist die Umsetzung eigener AR-Anwendungen zum Teil ohne großen Programmieraufwand möglich. In jedem Fall sind jedoch anwendungsspezifische Anpassungen an die eigenen Anforderungen notwendig [PBDM07].

Eine stark verbreitete Bibliothek zur Entwicklung von AR-Anwendungen ist **ARToolkit** [KB99]. Hierbei handelt es sich um eine Bibliothek für den nicht kommerziellen Einsatz unter GPL, welche bereits seit 1999 kostenlos verfügbar ist. Sie unterstützt allerdings nur markerbasierte Trackingsysteme und benötigt für genaue Trackingergebnisse anspruchsvolle Kameratechnik. FLARToolKit, ARTisan, AMIRE und jARToolKit sind nur einige der Entwicklungen der letzten Jahre, welche auf ARToolKit basieren und dem Endanwender die Programmierung eigener markerbasierter AR-Anwendungen ermöglichen.

In Tabelle 3-1 findet sich eine Auflistung aktuell am Markt befindlicher AR-Systeme und Entwicklungsplattformen, die Kriterien wie Verfügbarkeit, Frameworkcharakter, Tracking-technologie, Programmiersprache/-aufwand, sowie unterstütztem 3D-Inhalt grob zusammenfasst. Die aufgelisteten AR-Systeme repräsentieren eine Auswahl von Systemen mit hohem Bekanntheitsgrad. Neben diesen existieren zahlreiche Forschungs- und Eigenentwicklungen verschiedener Institute und Unternehmen, der Betrachtung jedoch keinen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit leistet. Im Folgenden werden die genannten Systeme kurz beschrieben.

- **AR-media Plug-In** ist ein kommerzielles Plug-In der Firma Inglobe Technologies für den 3D-Modeller Google Sketchup. Es ermöglicht das markerbasierte Einblenden von Sketchupmodellen in Videoströme [BHK09].
- **DART** (Designer's Augmented Reality Toolkit) nutzt Markertracking und funktioniert als Plug-In zur Standardsoftware Macromedia Director und bietet zahlreiche Funktionen zur Visualisierung früher Designphasen, besonders beim Übergang vom Storyboard zu Prototypen [MGB+03, MGDB04].
- **D'Fusion Studio** ist die kommerzielle Entwicklungsplattform der Fa. Total Immersion. Total Immersion entwickelt vornehmlich Anwendungen für den Entertainmentbereich und stellt mit D'Fusion Studio ein AR-Framework zum Erzeugen hochwertiger AR-Animationen zur Verfügung. Neben 2D- und 3D-Markertracking wird ein Gesichtstracking angeboten. AR-Inhalte werden durch ein PlugIn im Modellierer Maya von AutoDesk erzeugt. Die Konfiguration und Animation von AR-Szenen erfolgt durch die Skriptsprache Lua. D'Fusion Studio enthält eine eigene Renderengine und Werkzeuge zur Kamerakalibrierung [TI09].
- **DWARF** (Distributed Wearable Augmented Reality Framework) ist ein auf *CORBA* basierendes Framework der Universität München, das teilweise auf dem Open Source Framework ARToolKit aufbaut. Es ermöglicht die flexible Anbindung verschiedener Trackingquellen, ist jedoch nicht frei erhältlich [BBK+01].

Tabelle 3-1: Überblick AR-Softwaresysteme [eigener Entwurf]

Name	Verfügbarkeit	SDK	Tracking		Bemerkungen
			Marker-tracking	Tracking-erweiterungen	
<b>AR-media Plug-In</b>	⊙ Kommerzielles Google SketchUp Plug-In	○	●	○	- 3D: nur SketchUp
<b>ARToolkit</b>	● GPL / kommerzi- elle Lizenz	●	●	○	- C, C++ - 3D: <i>VRML</i>
<b>DART</b>	⊙ GPL	⊙	●	⊙ <i>VRPN</i> Tracking Interface	- PlugIn für Macromedia Director ( <i>W3D</i> )
<b>D'Fusion Studio</b>	● Kommerzielle Lizenz	●	●	⊙ markerless 2D/3D- object tracking	- Lua Skript - 3D: bel. 3D- Formate
<b>DWARF</b>	○ GPL	●	●	⊙	- freie Sprach- wahl durch CORBA- Architektur - 3D: <i>VRML</i> , <i>OpenInventor</i>
<b>Instantreality</b>	● Kommerzielle Lizenz	●	●	●	- C++ - 3D: <i>VRML</i> , <i>X3D</i>
<b>Morgan AR / VR Framework</b>	● Kommerzielle Lizenz	●	●	●	- C++ - 3D: <i>VRML</i> , <i>X3D</i> , <i>Cal3D</i>
<b>Studierstube</b>	⊙ GPL / kein kom- merzieller Einsatz	●	●	● OpenTracker Interface	- C++ - 3D: <i>VRML</i>
<b>Tinmith</b>	⊙ GPL / nicht ver- fügbar	●	●	⊙ properitäres Inter- face ( <i>GPS</i> , ...)	- Outdoor Apps - C++ - 3D: <i>VRML</i> , <i>X3D</i>
<b>Unifeye SDK</b>	● Kommerzielle Lizenz	●	●	● Beliebig erweiter- bar (Plug-In Kon- zept)	- freie Sprach- wahl (COM-Obj) - 3D: <i>VRML</i> , <i>JT</i> , <i>W3D</i> - Integrierte GUI

● Anforderung voll erfüllt    ⊙ Anforderung teilweise erfüllt    ○ Anforderung nicht erfüllt

- **Instantreality** ist eine Entwicklungsumgebung für AR- und VR-Anwendungen des Fraunhofer-Instituts für Grafische Datenverarbeitung (IGD). Eine Beta-version der Software kann auf Anfrage kostenlos bezogen werden, für gewerbliche Zwecke steht eine kostenpflichtige kommerzielle Lizenz zur Verfügung [FBB09].
- Das **Morgan AR / VR Framework** besteht aus einer Reihe von Werkzeugen und C++-Bibliotheken des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Informationstechnik. Es enthält eine proprietäre Renderengine zur Darstellung verschiedener Geometrieformate und ermöglicht das Anbinden unterschiedlicher Trackingsysteme. Lizenzen für den akademischen Einsatz werden auf Anfrage kostenlos vergeben. Lizenzen für den kommerziellen Einsatz können beim Fraunhofer FIT erworben werden [BHK09].
- Das Framework **Studierstube** basiert auf C++ und enthält einen großen Klassensatz zum Tracking und Anzeigen von 3D-Objekten. Das fortlaufende Projekt der TU Graz wird ständig von Professoren bzw. Studenten weiterentwickelt, wodurch es für eine frei verfügbare Software große Komplexität erreicht hat [SFH+02].
- **Tinmith** ist eine Forschungsplattform der Universität von Süd Australien mit dem Fokus auf mobile Outdoor AR. Es bietet zahlreiche Funktionen zur bidirektionalen Interaktion zwischen Mensch und Maschine mittels Markerhandschuh. Die Software ist nicht frei erhältlich [PT01].
- Das **Unifeye SDK** ist ein kommerzielles Softwareframework der Firma Metaio GmbH für die Entwicklung professioneller AR-Anwendungen. Das Framework implementiert zahlreiche Funktionalitäten zu Bildverarbeitung, Tracking und Rendering. Diese können über eine ActiveX-Komponente in eigene Anwendungen integriert werden. Das SDK beinhaltet ein optisches Markertracking und ermöglicht das Einbinden von externen Trackingsensoren (GPS, IR, etc.) über ein Plug-In Konzept [Gel07].

Die Auflistung verdeutlicht die Vielfältigkeit von Systemen und Anwendungen (vgl. 2.1.3) im Forschungsgebiet der Augmented Reality Technologie. Folglich ist das Durchführen von Untersuchungen zum Einsatz der Augmented Reality Technologie als Werkzeug für Soll/Ist-Vergleiche mit mehreren Systemen möglich. Der geplante kommerzielle Einsatz im Fertigungsplanungsprozess setzt ein eben solches Lizenzmodell voraus, so dass fünf der zehn in Tabelle 3-1 aufgeführten Systeme an diesem Kriterium ausscheiden. Die Entscheidung im Rahmen dieser Arbeit das Unifeye-SDK als zentrales AR-System zu verwenden ist durch dessen starke industrielle Ausrichtung begründet [PBDM07]. Der industrielle Fokus, sowie die Möglichkeit beliebige Trackingsysteme anzubinden sind sowohl beim Instantreality- als

auch beim Morgan AR / VR Framework ebenfalls vorhanden. Gegen diese grenzt sich Unifeye SDK mit einer konfigurierbaren GUI und dem unterstützten JT-Datenformat ab, das sich in den letzten Jahren zum bevorzugten 3D-Datenaustauschformat in der Industrie entwickelt hat [EHG10]. Die integrierte GUI implementiert alle SDK-Funktionen, so dass sofortige Untersuchungen ohne gesonderten Entwicklungsaufwand möglich sind.

#### 3.2.4 Unifeye Planner

Die auf dem Unifeye SDK basierende AR-Planungssoftware Unifeye Planner durchlief in den letzten Jahren einen iterativen Entwicklungsprozess mit dem Ziel eine industrielle Augmented Reality Anwendung zu erstellen, welche sich für den Einsatz in verschiedenen Anwendungsfeldern der Fabrikplanung eignet [PBDM07]. Die Entwicklung durchlief mehrere Stationen, in denen verschiedene Hard- und Softwarekonfigurationen in mehrere Prototypen einfließen. Entsprechend dem Modell einer iterativen Systementwicklung angewandter Wissenschaft [Ulr84] wurden durch den Systemeinsatz in realen Szenarien neue Anforderungen für den folgenden Entwicklungsschritt gesammelt und in der nächsten Systemversion umgesetzt.

Die drei wichtigsten Entwicklungsstufen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

##### 3.2.4.1 Historische Entwicklung

###### Prototyp 1: Hard- und Softwareuntersuchungen

Der erste Prototyp war zum allgemeinen Einsatz für Fabrik- und Layoutplanungsaufgaben vorgesehen und implementierte eine Client-Server-Architektur, um via Netzwerk direkt auf benötigte Daten in angebundenen Planungssystemen zuzugreifen (vgl. Abbildung 3-3).



Abbildung 3-3: Prototyp 1 [Doi03]

Neben einem markerbasiertem Tracking wurde das Infrarot-Trackingverfahren der Firma ART untersucht [ART09]. Als Client wurde der Einsatz von zwei verschiedenen mobilen und einem stationärem PC getestet. Zur Anzeige diente ein HMD sowie ein Touchscreen Monitor. Der im ARVIKA- Projekt entwickelte AR-Browser [Fri04] wurde als Visualisierungssystem auf dem Client eingesetzt.

Der Test unter realen Einsatzbedingungen offenbarte drei wesentliche Systemschwächen:

- Die Client-Server-Architektur verlangt eine permanente Netzverbindung, welche in der Fabrikhalle durch fehlende LAN-Anschlüsse und Instabilität von WLAN-Verbindungen nicht gewährleistet werden kann.
- Die Visualisierung mit HMD und Mobile PC erfolgte nicht performant genug und mit zu niedriger Auflösung, wohingegen der Standard PC für den mobilen Einsatz ungeeignet war.
- Das Infrarottrackingsystem arbeitet nicht stabil und deckt nur einen kleinen Arbeitsraum ab.

Aus diesen Punkten wurde Handlungsbedarf zur Weiterentwicklung abgeleitet.

### **Prototyp 2: Stabilität und Analysefunktionen**

Der zweite Prototyp setzt konsequent die Anforderungen aus den Projekten mit dem ersten System um. Die mobile Client-Server-Architektur wurde durch eine Stand-Alone-Installation auf einem leistungsfähigen Desktop PC ersetzt. Aufgrund der Trackingerfahrungen mit dem ersten Prototyp wurde mit dem Unifeye SDK der Fa. Metaio [met09] ein optisches Markertracking umgesetzt. Die ebenfalls auf dem Unifeye SDK basierende Benutzeroberfläche implementierte zusätzliche Funktionen wie die Anbindung alternativer Videoquellen (Videodateien oder Livestreams), das Laden von 3D-Gemometriemodellen sowie Konfigurationsdateien für Trackingdaten und Kamerakalibrierungen. Neben diesen AR-spezifischen Funktionen wurde der Funktionsumfang um anwendungsrelevante Implementierungen ergänzt. Virtuelle Modelle unterstützten verschiedene Ansichten (Volumenmodell, Drahtgittermodell, Verdeckungsgeometrie) und ließen sich über die Benutzeroberfläche manipulieren (Translation, Rotation, Schnitte). Zusammengestellte Szenarien konnten für Nachbearbeitung und Dokumentation gespeichert werden. Mit dieser Konfiguration wurde großes Potenzial zur Durchführung von Störkantenanalysen erkannt [SD05].



Abbildung 3-4: Prototyp 2 [SD05]

In Abbildung 3-4 ist die Anwendung des Systems zur Überprüfung von Störkanten innerhalb einer Förderanlage dargestellt. Die virtuelle Fahrzeugkarosse (rot) wird in das Videobild überlagert, um so die Kollisionsfreiheit des neuen Fahrzeugmodells in der bestehenden Produktionsumgebung nachzuweisen.

Ogleich das System gegenüber dem ersten Prototypen wesentlich performanter und robuster war und eine deutlich verbesserte Bedienbarkeit aufwies, konnte es nicht erfolgreich in den Serienbetrieb transferiert werden. Hierfür wurden zwei wesentliche Gründe identifiziert:

1. Die Genauigkeit des Markertrackings ist in Kombination mit der niedrigen Auflösung des Kamerabildes zu ungenau für die zu realisierenden Planungsaufgaben.
2. Es existiert kein erprobtes Verfahren um virtuelle Objekte mit verifizierbarer Genauigkeit im realen Arbeitsumfeld zu positionieren.

#### **Prototyp 3: fotobasiertes Planungssystem**

Das fotobasierte Planungssystem, welches als dritter Prototyp entwickelt wurde, baut auf dem Markertracking des Unifeye SDK auf. Die Genauigkeit hat sich gegenüber dem zweiten Prototyp durch Verwendung einer hochauflösenden digitalen Fotokamera signifikant gesteigert [PBDM07]. Neben der hohen Auflösung von 12 Megapixeln garantieren eine stabile und fixierbare Kameraoptik, sowie die Verwendung eines zertifizierten Kalibrierprozesses genaue Trackingergebnisse. Die Auflösung ermöglicht das Erkennen einer ausreichenden Anzahl von Markerpixeln im Bild, während die Kameraoptik konstante optische Verzeichnungsparameter sicherstellt, die mit der Kalibrierung nach AICON exakt ermittelt werden [God02].

Die Software ist auf einem Standard-PC oder Laptop mit aktueller Grafikkarte (Stand: 2009) performant ausführbar. Zur Visualisierung kommt der wahlweise auf OpenGL oder DirectX basierende Renderer der Fa. Bitmanagment zum Einsatz, welcher 3D-Daten im JT- und VRML-97-Format unterstützt. Die Systementwicklung erfolgte mit starkem Fokus auf Benutzerfreundlichkeit, so dass eine klar strukturierte Benutzeroberfläche entstand. Abbildung 3-5 zeigt einen Screenshot der Benutzeroberfläche.

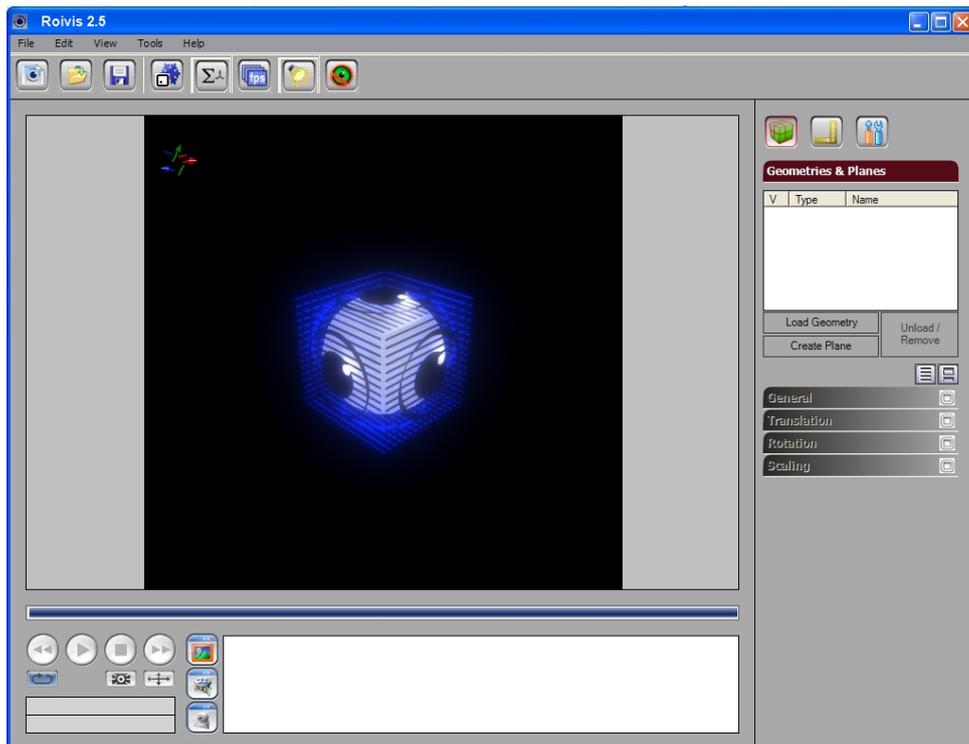


Abbildung 3-5: Prototyp 3 - Benutzeroberfläche [Pen08]

Die Benutzeroberfläche gliedert sich in die vier Bereiche der Bildquellenverwaltung (unten), dem Renderfenster (darüber), der Werkzeugbox (rechts) mit den Kategorien Objektverwaltung, Vermessungen und Konfiguration, sowie der Menüzeile (oben), welche Funktionen zur Projektverwaltung bereit stellt. Die vorgestellten Bereiche bieten Funktionen an, welche für das Zusammenstellen einer AR-Szene notwendig sind:

- Auswahl einer Bildquelle
- Laden oder Erstellen einer Systemkalibrierung
- Konfiguration des Trackingszenarios
- Laden und Manipulieren virtueller Objekte

### 3.2.4.2 Architektur

Das Softwaresystem basiert auf dem AR-Entwicklungsframework Unifeye SDK der Fa. Metaio. Das Framework implementiert Funktionen für Tracking, Bilderfassung, Rendering und Szenenmanipulation, welche in einer ActiveX Komponente zusammengefasst sind. Diese kann als Bibliothek in eigene Softwareprojekte eingebunden werden. Die API des ActiveX-Objekts ermöglicht den direkten Zugriff auf die umfangreichen Funktionen.

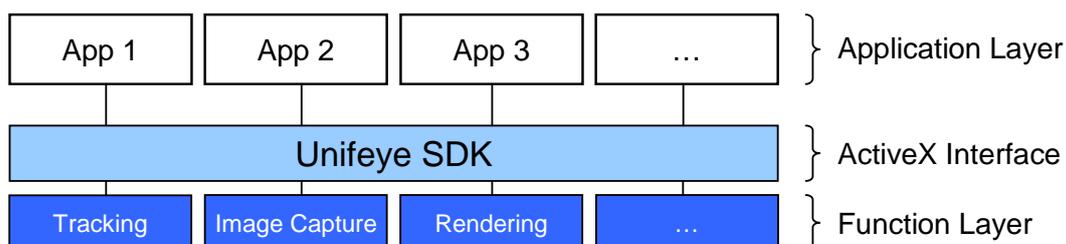


Abbildung 3-6: Unifeye SKD [nach Gel07]

### 3.2.4.3 Trackingschnittstellen

Der modulare Aufbau des Unifeye Frameworks ermöglicht die Anbindung verschiedener Trackingsysteme wie z. B. optischem Markertracking, Infrarottracking oder mechanischem Tracking. Unabhängig von der eingesetzten Trackingtechnologie werden Trackingsysteme identisch als ein allgemeines Sensor-Objekt behandelt. Ein Sensor-Objekt wird durch eine beliebige Anzahl von Sensorkoordinatensystemen beschrieben, welche jeweils ein Trackingtarget repräsentieren. Beispiele für Trackingtargets sind Marker im Fall vom Markertracking oder Infrarottrargets beim Infrarottracking. Eine detaillierte Beschreibung der Konfiguration von Trackingsystemen im Unifeye Framework findet sich in Abschnitt 5.1.4.

### 3.2.4.4 Zusammenfassung

Mit dem Unifeye Planner, steht ein AR-Softwaresystem zur Verfügung, das die Entwicklung verschiedener industrieller AR-Anwendungen unterstützt. Seine Entstehung wurde erst durch die langfristige Kooperation von Partnern aus Industrie und Forschung ermöglicht [Fri04, FW06, SZ11]. Dadurch wurde eine gute Basis für die Entwicklung von industriellen AR-Anwendungen geschaffen. Die wesentliche Herausforderung liegt nun darin, AR-Werkzeuge zu entwickeln, die sich noch stärker an den industriellen Anforderungen orientieren und in produktiv eingesetzte Systeme mit hoher Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit wandeln.

### 3.3 Zusammenfassung und Schwerpunktauswahl

Zur Durchführung von Soll/Ist-Vergleich stehen heute mehrere Verfahren aus der Domäne der Messtechnik zur Verfügung. Mit allen lässt sich der Ist-Zustand eines Objekts erfassen und anschließend gegen ein Planungsmodell vergleichen. Derartige Vergleiche sind jedoch nicht durchgängig in den Planungsprozess integriert und werden nur vereinzelt durchgeführt. Eine der Ursachen hierfür ist oft das mit der Organisationsstruktur eines Unternehmens einhergehende Bereichsdenken [Cla09]. Mit einem Soll/Ist-Vergleich verbundener Kosten- und Zeitaufwand amortisiert sich innerhalb eines Planungsprojektes erst dann, wenn der ausführende Bereich die Verantwortlichkeit dafür bereits abgegeben hat. Ziel muss es daher sein, Aufwand und Komplexität von Soll/Ist-Vergleichen zu reduzieren.

Das Potenzial der AR-Technologie für Soll/Ist-Vergleiche wurde bereits vor einigen Jahren erkannt. Forschungsprojekte wie ARVIKA [Fri04], ARTESAS [FW06] und AVILUS [SZ11] haben sich intensiv mit industriellen AR-Anwendungen auseinandergesetzt. Trotz der Beteiligung starker Industriepartner haben sich nur wenige Anwendungen über den Status eines Demonstrators hinaus entwickelt [Reg06, KP10]. Oft werden die industriellen Prozesse der Produktentstehung und Produktionsplanung bei der Entwicklung einer AR-Lösung nicht gründlich genug analysiert. Zu den bereits komplexen Fertigungsplanungsprozessen gesellen sich dann die Prozesse des AR-basierten Soll/Ist-Vergleichs wie zum Beispiel Rüstaufwand für Trackingtechnologie, Bereitstellung und Aufbereitung von Konstruktionsdaten, Vermessungsarbeiten zur Systemregistrierung, Systemkalibrierungen, sowie die manuelle Auswertung und Aufbereitung von Vergleichsergebnissen. Um diesen Mehraufwand zu reduzieren und diese notwendigen Prozessschritte besser in den Planungsprozess zu integrieren, ist es notwendig sie aus anwendungs- bzw. praxisorientierter Sicht zu untersuchen.

Zur Durchführung dieser Untersuchungen eignet sich die AR-Entwicklungsplattform Unifeye SDK der Fa. Metaio. Neben einer offenen Schnittstelle zur Anbindung verschiedener Trackingsysteme grenzt sie sich durch die Unterstützung des JT-Datenformates, sowie eine integrierte GUI von anderen Plattformen am Markt ab. Diese Bedingungen ermöglichen zeitnahe Untersuchungen und Praxistests, ohne vorherige Softwareentwicklung.

Schwerpunkt dieser Arbeit ist die detaillierte Untersuchung des konkreten Prozesses „Soll/Ist-Vergleich von Betriebsmitteln in der Fertigungsplanung“, die Identifikation von technischem Handlungsbedarf innerhalb der einzelnen Prozessphasen und die Verbesserung von mindestens einem der festgestellten Sachverhalte.

Das folgende Kapitel ist der detaillierten Analyse des AR-basierten Vergleichsprozesses gewidmet. In diesem Zusammenhang findet eine Analyse von Betriebsmitteln als Vergleichsobjekt statt, wobei der Fokus auf Fertigungsbetriebsmitteln des Karosseriebaus eines Automobilherstellers liegt.

## **4 Anforderungsanalyse**

Zu Beginn dieses Kapitels wird ein allgemeiner Überblick über Betriebsmittel aus dem Karosserierohbau in der Automobilindustrie gegeben. Ein besonderer Fokus wird hierbei auf die im Karosserierohbau eingesetzten Betriebsmittel gelegt, die neben ihrem hohen Automatisierungsgrad vor allem durch eine zunehmende Flexibilität gekennzeichnet sind. Dabei werden die einzelnen Phasen des Betriebsmittellebenszyklus vorgestellt und ihre wichtigsten Problemfelder im Zusammenhang mit daraus resultierenden Soll-/Ist-Abweichungen beschrieben. Weiterhin werden Bezugssysteme und Referenzpunkte von Karosseriebaubetriebsmitteln beschrieben, sowie die zu vergleichenden Betriebsmitteleigenschaften abgegrenzt. Anschließend wird der Prozess zum AR-basierten Soll-/Ist-Vergleich im Detail untersucht, um konkreten Handlungsbedarf für die folgenden Kapitel abzuleiten.

### **4.1 Betriebsmittel**

Nach [DIN6385] umfasst der Begriff Betriebsmittel alle Anlagen, Einrichtungen, Maschinen, Werkzeuge, Vorrichtungen, Betriebs- und Hilfsstoffe, die in einem Arbeitssystem daran beteiligt sind die Arbeitsaufgabe auszuführen.

#### **4.1.1 Betriebsmittellebenszyklus**

Vor der Betriebsmittelplanung stehen die Produktentwicklung und ein daraus abgeleiteter Produktionsprozess. Aus dem Produktionsprozess und dem aktuellen Bauzustand der Produktionsumgebung resultiert der Planungsfall; Neu-, Anpassungs- oder Variantenplanung (vgl. Tabelle 2-1, Seite 27). Während der Betriebsmittelplanung werden Informationen zu Fabrikstruktur, Produkt, Produktionsprozess, Betriebsmittelzuverlässigkeit und -kosten zu einem Konzept verarbeitet [Sch07]. Dieses wird in der Entwurfsphase weiter detailliert und in der Realisierungsphase umgesetzt. Mit dem Produktionsanlauf beginnt die Betriebsphase, nach der sich entweder der Abriss oder eine Sanierung im Rahmen einer Umwidmung anschließt (vgl. Abbildung 4-1).

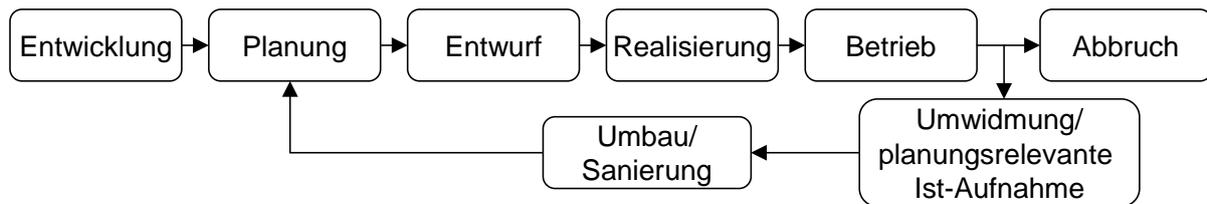


Abbildung 4-1: Lebenszyklusmodell eines Betriebsmittels in Anlehnung an [Gre01]

In den Phasen von Realisierung und Betrieb kommt es zu Änderungen in der realen Produktionsumgebung und an den Betriebsmitteln, welche zum Teil nicht in das Planungsmodell des Entwurfs zurückfließen (vgl. Kap. 4.2.1). Insbesondere bei einer Anpassungs- oder Variantenplanung stellt die Ist-Aufnahme daher eine der wichtigsten Vorarbeiten dar [Gre01].

#### 4.1.2 Betriebsmittel im Karosseriebau

Innerhalb der Automobilproduktion nimmt der Karosseriebau eine herausragende Stellung ein. Der Karosserierohbau, in dem die Rohkarosserie zusammengesetzt und damit die Außenhaut eines Automobils gefügt wird, bestimmt maßgeblich das Erscheinungsbild des Automobils und seiner Marke. Aus diesem Grund wird die Fertigung der Fahrzeugkarosserie auch bei fast allen Automobilherstellern als Kernkompetenz gesehen. So beträgt die Eigenleistungstiefe im Karosserierohbau zwischen 80 und 100 Prozent und ist damit fast dreimal so hoch wie in den restlichen Fertigungsbereichen einer Automobilproduktion, deren durchschnittliche Eigenleistungstiefe bei etwa 25 bis 35 Prozent liegt [RT08].

##### 4.1.2.1 Produktionsbezogene Eingliederung des Karosserierohbaus

Eine Automobilproduktion besteht in der Regel aus insgesamt fünf „Hauptgewerken“: dem Presswerk, dem Karosserierohbau, der Oberfläche (Lackiererei), dem Bereich Antriebsstrang (Powertrain) und der Montage (vgl. Abbildung 4-2).

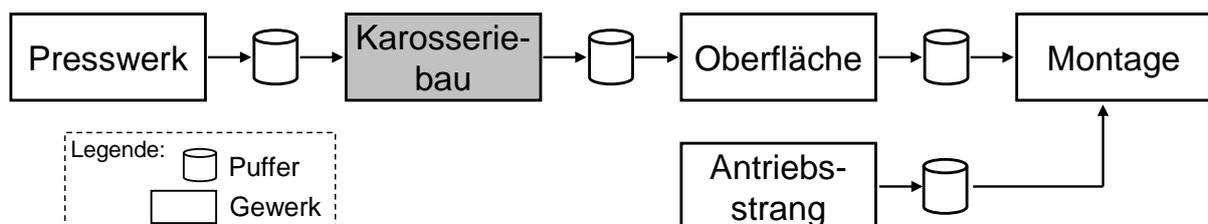


Abbildung 4-2: Produktionsbezogene Eingliederung des Karosserierohbaus

Der Begriff „Gewerk“ hat sich in diesem Zusammenhang in der Automobilindustrie fest etabliert und kann allgemein als Synonym für die Begriffe Bereich bzw. Fertigungsbereich verstanden werden. Die im Presswerk hergestellten Erzeugnisse werden im Karosserierohbau in mehreren Arbeitsschritten zur Fahrzeugkarosserie zusammengefügt. Insgesamt setzt sich eine PKW-Rohkarosse aus 300 bis 500 Einzelteilen zusammen, die mit durchschnittlich 3500 bis 5000 Schweißpunkten oder ähnlichen Fügeäquivalenten<sup>6</sup> nicht lösbar miteinander verbunden werden. Im Anschluss findet eine Reinigung der fertigen Rohkarossen statt, bevor diese zur Lackierung an das Gewerk Oberfläche übergeben werden. In der Endmontage wird die lackierte Rohkarosserie mit der Innenausstattung (z.B. Cockpit, Sitze) und dem Antriebsstrang komplettiert.

#### 4.1.2.2 Aufbau und Strukturierung des Karosserierohbaus

Der Karosserierohbau einer Automobilfabrik setzt sich in aller Regel aus mehreren Linien zusammen, was die Produktion in sinnvolle Untergruppen gliedert. Dabei wird zwischen Haupt- und Nebenlinien unterschieden. In den Nebenlinien werden die einzelnen aus dem Presswerk stammenden Erzeugnisse zu Baugruppen und Unterbaugruppen zusammengefügt. Anschließend erfolgt der Weitertransport dieser vorgefertigten Module zur Hauptlinie, wo in mehreren Schritten die gesamte Fahrzeug-Rohkarosserie entsteht. Die Hauptlinien eines Automobilrohbaus gliedern sich in aller Regel in mehrere „Aufbaustufen“, deren Inhalte je nach OEM variieren können. Die Aufteilung der Hauptlinien eines Karosseriebaus der Volkswagen AG ist in Abbildung 4-3 dargestellt.

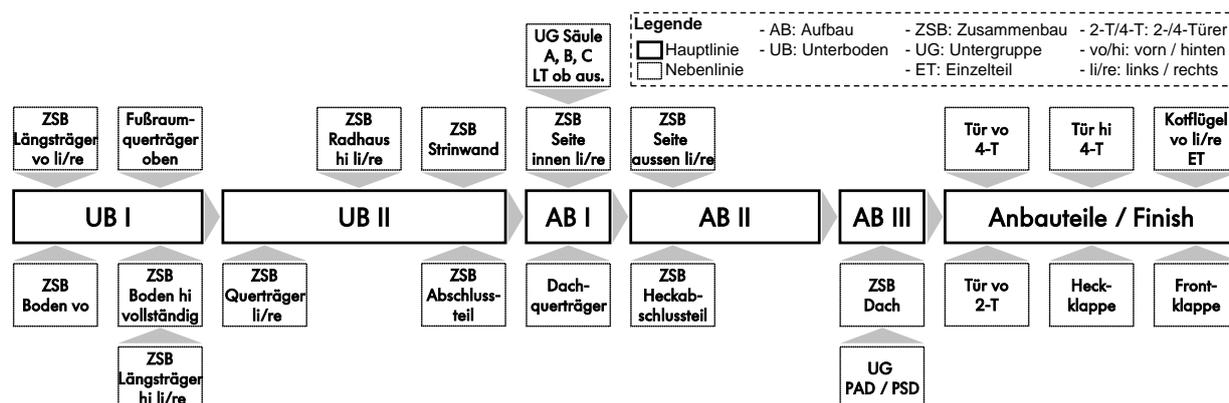


Abbildung 4-3: Strukturierung eines Karosserierohbaus in der Automobilindustrie [Quelle: Volkswagen AG]

<sup>6</sup> Neben dem Wärmepunktschweißen werden im Karosseriebau folgende Fügetechniken eingesetzt: Kleben, Schutzgasschweißen (MIG/MAG), Laserschweißen, Laserlöten, Löten, Nieten, Falzen und Clinchen

Wie in Abbildung 4-3 zu erkennen ist, gliedern sich die Hauptlinien in zwei Unterboden-, drei Aufbaulinien und eine Finish- bzw. Anbauteilelinie. Innerhalb der ersten Unterbodenlinie (UB1) werden die Zusammenbaugruppen Boden hinten, Boden vorn, Längs- und Fußraumquerträger zur Bodengruppe gefügt. Diese wird in Unterbodenlinie zwei (UB2) durch Querträger, Radhäuser, Stirnwand und Abschlussteil komplettiert. Auf die gesamte Bodengruppe werden in der ersten Aufbaulinie (AB1) die inneren Seitenwände, Säulen und der Dachquerträger gefügt. In Aufbaulinie zwei und drei (AB2, AB3) schließt sich das Fügen der äußeren Seitenteile, des Heckabschlussteils sowie des Daches an, das je nach Variante als Blech-, Schiebe- oder Panoramadach ausgeführt ist. Als Ergebnis liegt nach den Aufbaulinien das so genannte Karosseriegerippe vor, das in der Finishlinie durch Klappen, Türen und Kotflügel zur gesamten Fahrzeugkarosse komplettiert wird.

### 4.1.2.3 Aufbau und Strukturierung von Fertigungsstationen

Eine Fertigungslinie im Karosseriebau gliedert sich in einzelne Stationen und fasst diese durch übergeordnete Schutz- und Steuerungstechnik zusammen. Eine Fertigungsstation kann sowohl Bestandteil einer Fertigungslinie sein oder auch als isolierte Fertigungsinsel fungieren. Im Speziellen wird zwischen Geometriestationen und Ausschweißstationen unterschieden. In Geometriestationen wird die geometrische Maßhaltigkeit durch Fügen der Einzelteile der Karosserie erzeugt während Ausschweißstationen dazu genutzt werden, an der geometrisch fixierten Karosserie notwendige Fügeverbindungen zum Herstellen der gewünschten Festigkeit zu fertigen. Abbildung 4-4 zeigt das Modell einer typischen Geometrie-Station aus dem Karosseriebau eines Automobilherstellers.

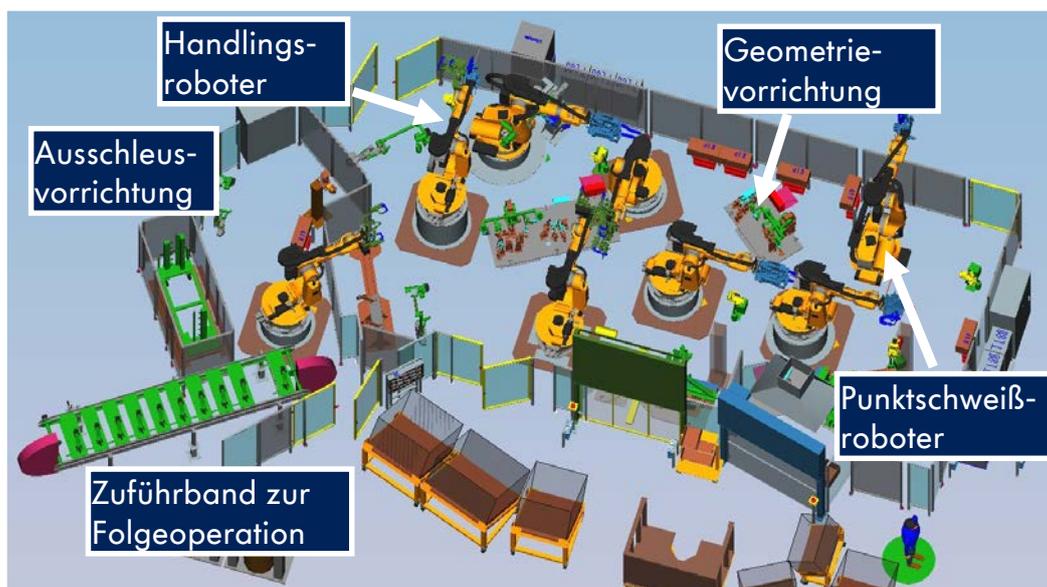


Abbildung 4-4: Geometriestation im Karosseriebau [Quelle: Volkswagen AG]

Typische Fertigungsstationen<sup>7</sup> bestehen aus einem oder mehreren Robotern (zum Handhaben, Fügen etc.) sowie aus Elementen, die für den stationsbezogenen Materialfluss verantwortlich sind. Diese rohbauspezifischen Zellenkomponenten lassen sich allgemein in typengebundene und typenungebundene Betriebsmittel unterteilen. Während typenungebundene Betriebsmittel produktunabhängig eingesetzt werden können (z.B. Schweißzangen, Vorrichtungen), weisen typengebundene Betriebsmittel einen konkreten Produktbezug auf. Beispiele hierfür sind spezielle Vorrichtungskomponenten (z.B. Spannelemente, Konturstücke) sowie Spezialbehälter. Hinsichtlich der angestrebten Anlagenflexibilisierung gewinnen vor allem die typenungebundenen Betriebsmittel aufgrund ihres flexibleren Einsatzspektrums zunehmend an Bedeutung.

#### 4.1.3 Bezugssysteme und Referenzpunkte

Fertigungslinien, Stationen und einzelne Vorrichtungen unterscheiden sich erheblich in ihrer Dimensionierung, sowie bei vorhandenen Bezugssystemen und Referenzelementen. Da diese Eigenschaften einen maßgeblichen Einfluss auf die Wahl von Mess- und Untersuchungswerkzeugen haben, werden sie im Folgenden erörtert. Dazu abstrahiert Abbildung 4-5 die Struktur einer Fabrik mit speziellem Fokus auf Betriebsmittel in einer Karosserierohbauhalle.

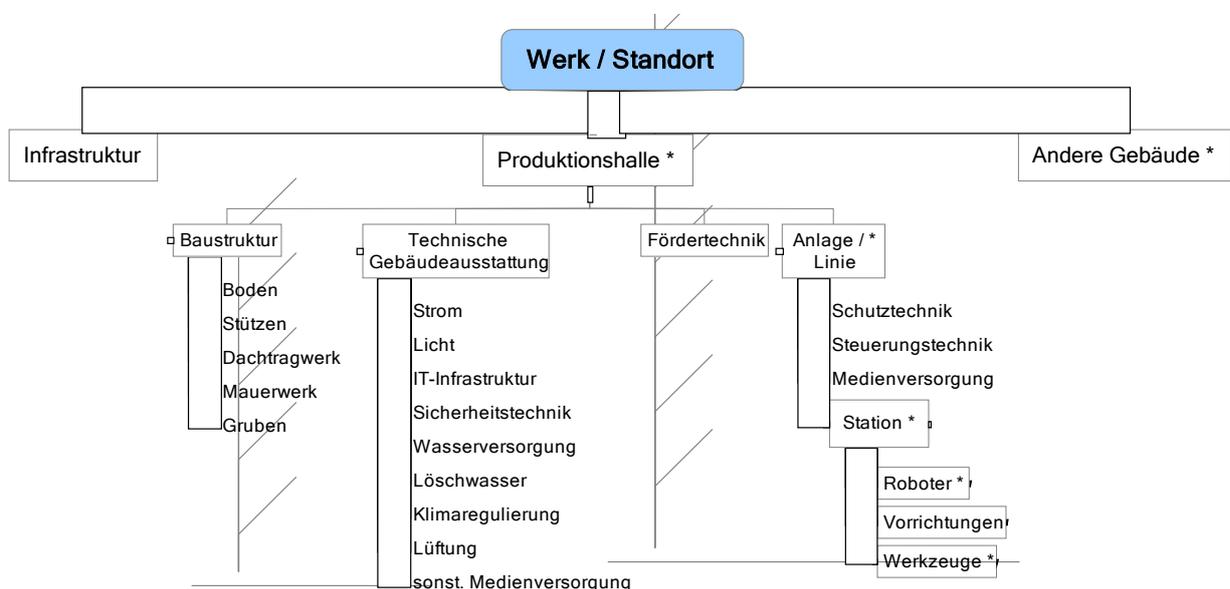


Abbildung 4-5: abstrakte Fabrikstruktur [eigener Entwurf]

<sup>7</sup> In Analogie zum Begriff der Fertigungsstation werden abhängig vom jeweiligen Fachbereich und der damit verbundenen Blickrichtung meist die Begriffe Fertigungszelle, SPS-Bereich oder Bandabschnitt als Synonyme verwendet. Ein einheitlicher Sprachgebrauch existiert bis heute nicht.

Auf dem Werksgelände eines Standortes befinden sich neben Infrastrukturelementen und anderen Gebäuden die Produktionshallen, die oft einem bestimmten Gewerk zugeordnet sind. Die Hallen umfassen bauliche Strukturelemente (Fundament, Wände, Dach, Stahlbau, usw.), technische Gebäudeausstattung (TGA) und natürlich die oben genannten Produktionslinien. Eine Linie gliedert sich in einzelne Stationen, deren zentrales Element eine Vorrichtung darstellt. Vorrichtungen sind je nach Fertigungsstrategie von automatisierter Produktionstechnik (z.B. Roboter) oder bei Werkereinsatz von manuellen Werkzeugen umgeben.

Der Standort sämtlicher Gebäude auf einem Werksgelände wird durch ein Werkskoordinatensystem beschrieben, dessen Ursprung sich in der Regel innerhalb des Werksgeländes befindet. Um eine Registrierung im Werkskoordinatensystem zu ermöglichen, werden auf dem Gelände Messpunkte definiert und durch die Installation permanenter Messelemente fixiert. Die Produktionshallen besitzen jeweils ein lokales Hallenkoordinatensystem, das die Anordnung sämtlicher installierter Produktionsmittel innerhalb der Halle beschreibt. Zur groben Orientierung innerhalb der Hallen, werden diese entsprechend dem Raster der Hallensäulen in rechteckige Sektoren eingeteilt. Auch hier existieren fixe Referenzpunkte, die das Einmessen in das Hallensystem ermöglichen. Im Idealfall sind sämtliche in der Produktionshalle vorhandenen Säulen vermessen und weisen entsprechende Referenzpunkte auf (vgl. Abbildung 4-6).

Abbildung 4-6: Referenzpunkt an Hallensäule (li); Vermessung mit Lasertracker (re) [eigene Aufnahme]

Die Position von Produktionslinien wird im Hallensystem beschrieben. Eine Referenzierung erfolgt über die bereits genannten Messpunkte in der jeweiligen Halle. Die Positionen von Stationen und Vorrichtungen innerhalb einer Linie sind ebenfalls durch das Hallenkoordinatensystem definiert. Darüber hinaus wird jede Station und somit jede Vorrichtung im Produktkoordinatensystem beschrieben. Im Fall einer Automobilfertigung befindet sich der Ursprung des Produktkoordinatensystems in der Mitte der Fahrzeugvorderachse. Die Referenz zum Produkt- bzw. Fahrzeugkoordinatensystem ermöglicht beispielsweise die Beschreibung von Produktionsprozessen mit Hilfe von Konstruktionsfeatures aus der Produktentwicklung.

Zum Einmessen in das Produktkoordinatensystem verfügt jede Vorrichtung über mindestens vier Referenzelemente (z. B. Bohrungen) in der Grundplatte. Die Koordinaten der Referenzpunkte definieren die Lage des Betriebsmittels im Fahrzeugkoordinatensystem und sind in der Regel unmittelbar an der Referenzbohrung angebracht. (Abbildung 4-7).

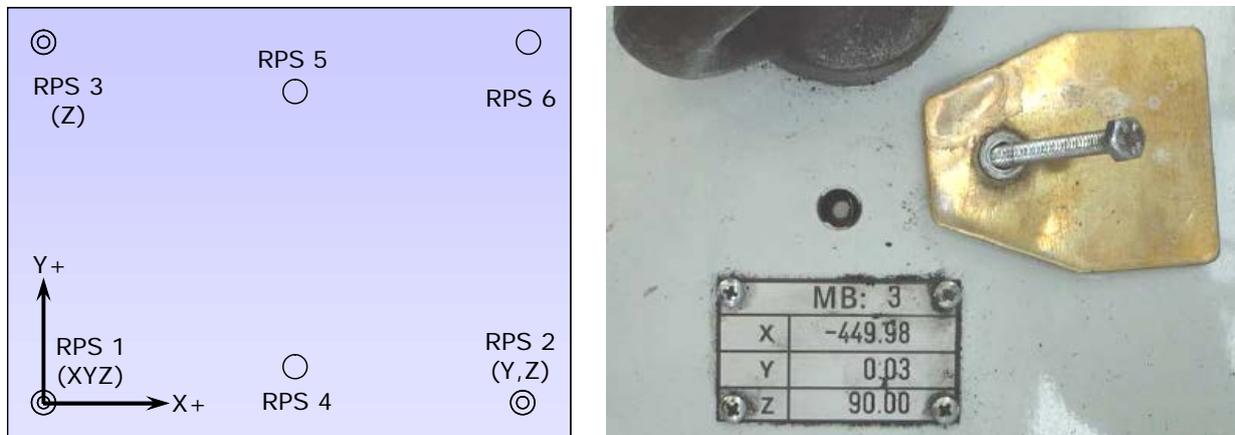


Abbildung 4-7: Referenzpunkte auf Vorrichtungsgrundplatte schematisch (re) und als reale Aufnahme (li)

Die Referenzbohrungen sind im normalen Betrieb abgedeckt, um sie gegen Verschmutzung zu schützen. Gemäß den Betriebsmittelkonstruktionsrichtlinien müssen sie jederzeit zugänglich sein. Die Praxis zeigt jedoch, dass Referenzelemente zum Teil durch Baugruppen, Kabelkanäle oder andere Elemente der Medienversorgung verdeckt sind.

#### 4.1.4 Abgrenzung der untersuchten Betriebsmitteleigenschaften

Beim Soll/Ist-Vergleich von Ist-Daten eines Betriebsmittels mit dessen Planungsdaten können zahlreiche Eigenschaften untersucht werden. Dies sind sowohl Objektdaten, Prozessdaten als auch organisatorische Daten.

Im ersten Fall werden vor allem geometrische und topologische Merkmale von Objekten untersucht, wozu beispielsweise Abmaße, Position und Baustruktur eines Betriebsmittels gehören. Im Fall von Prozessen lassen sich sämtliche planbaren und anschließend erfassbaren Prozessdaten wie z.B. physikalische Kenngrößen (Geschwindigkeiten, Temperaturen, Drücke), wirtschaftliche Größen (Produktivität, Kosten, Standzeiten) und andere Produktionsgrößen (Durchsatzraten) vergleichen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Erfassung und dem Vergleich geometrischer Objektdaten.

### 4.2 Geometrische Abweichungen

#### 4.2.1 Abweichungsursachen

Betriebsmittel entsprechen in ihrer geometrischen Ausführung oft nicht den Vorgaben der Konstruktion des Datenkontrollmodells (DKM). Diese Abweichungen werden durch verschiedene Fehlerquellen verursacht. Die organisatorische, technische und soziologische Komplexität eines Planungsvorhabens bietet viele Angriffspunkte für das Entstehen abweichender Planungsmodelle.

##### 4.2.1.1 Prozessbedingte Ursachen

Prozessbedingte Ursachen liegen in allen Phasen des Betriebsmittellebenszyklus: Planung, Realisierung, Anlauf, Betrieb, Umplanung (vgl. Abbildung 4-1, Seite 72). Nachfolgend werden diese Phasen im Hinblick auf mögliche Ursachen für Planabweichungen analysiert.

#### **Planung**

In Kapitel 2.2.4 wurden die Grundlagen der Produktionsplanung bereits erläutert und ein erster Eindruck zur Komplexität dieses Planungsprozesses gegeben. Der Fertigungsplanungsprozess von Betriebsmitteln im Karosseriebau gliedert sich grob in die vier Teilprozesse Layoutplanung, Betriebsmittelkonstruktion, Robotik / Simulation und Elektro- / Steuerungsplanung (vgl. Abbildung 4-8). In der Layoutplanung werden iterativ die Anordnung der Haupt- und Nebenlinien eines Karosseriebaus sowie der Materialfluss (Fördertechnik) zwischen denselben festgelegt. Die Betriebsmittelkonstruktion geschieht vom Groben ins Feine, wobei auf Basis eines groben Fertigungszellenlayouts die einzelnen Komponenten in Form möglichst typungebundener Standardelemente ausgewählt werden. Die auskonstruierten Betriebsmittel fließen in ein detailliertes Stations- oder Zellenlayout ein, aus dem das Mengengerüst und Mechanikpläne abgeleitet werden. Nach der Auswahl von Betriebsmittelkomponenten werden im Rahmen der Roboterplanung (Robotik / Simulation) Roboter und Werkzeuge definiert, denen mit Hilfe der Fügefolge aus der Prozessplanung konkrete Arbeitsumfänge zugewiesen werden. Das Robotermodell wird mit Hilfe von Simulationen zu Erreichbarkeiten und Zugänglichkeiten weiter detailliert und zur Offlineprogrammierung freigegeben sobald die Machbarkeit nachgewiesen ist. Die Elektro- und Steuerungsplanung beginnt in aller Regel erst kurz vor der Realisierungsphase, da die notwendigen Informationen erst spät in ausreichender Detaillierungsstufe vorliegen.

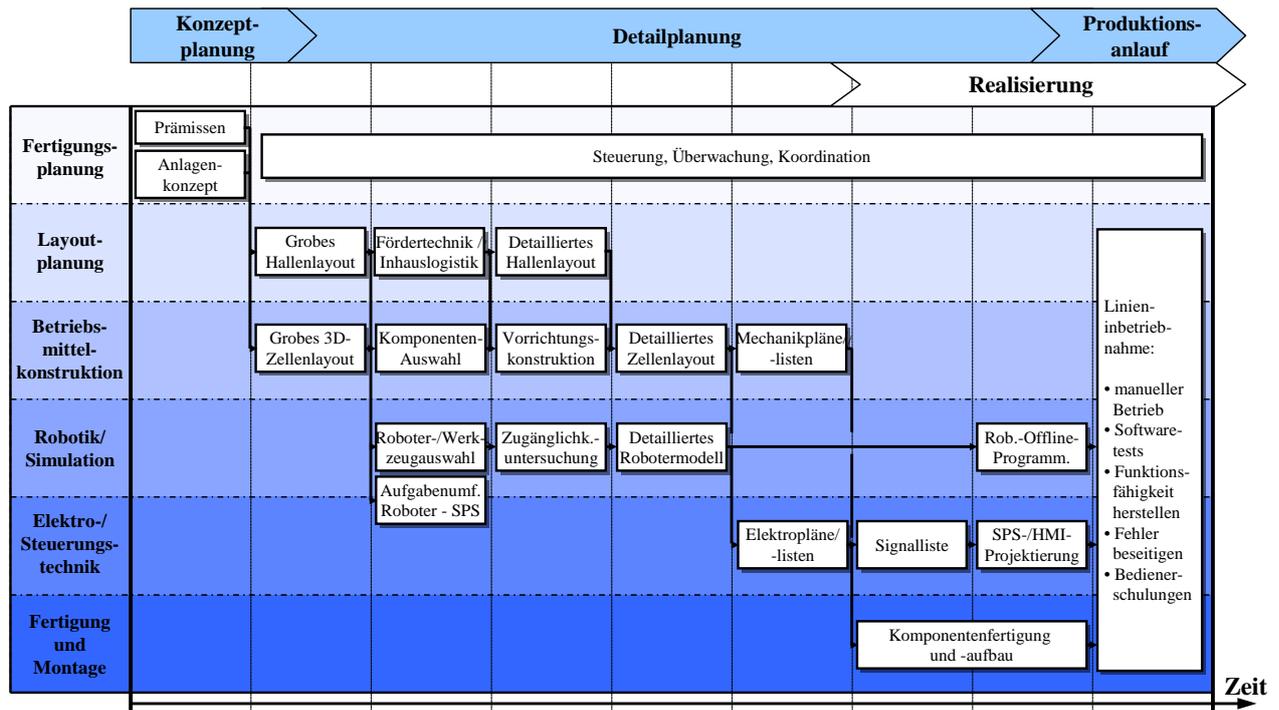


Abbildung 4-8: Vereinfachte Darstellung des Planungsprozesses von Betriebsmitteln im Karosseriebau [Kie07]

Wie in Abbildung 4-8 dargestellt, ist der heutige Betriebsmittelplanungsprozess durch eine weitgehend parallele Abarbeitung der Teilprozesse gekennzeichnet. Verschärft wird diese Situation durch stetig kürzer werdende Planungszyklen und zunehmend komplexe Produktionssysteme. Dem gegenüber steht die zeitintensive, manuelle Erstellung von Dokumentationsunterlagen. Da im stationsbezogenen Rohbau-Planungsprozess bis dato nur wenige bereichsinterne bzw. keine bereichsübergreifenden Standards existieren, werden heute eine Vielzahl unterschiedlicher Dokumente mit oftmals redundanten Inhalten in mehreren IT-Systemen erzeugt und verwaltet. Änderungen, deren Organisation eine zentrale Herausforderung in heutigen Planungsprozessen darstellt, werden in der Regel nicht in alle relevanten Arbeitsunterlagen gleichermaßen rückdokumentiert. Ein asynchrones Arbeiten auf Basis unterschiedlicher Datenstände ist die Folge.

### Realisierung

Insbesondere die Phase der Realisierung verdient besondere Aufmerksamkeit bei der Suche nach der Entstehung von Abweichung zwischen Planungsmodell und Realität, da bereits in der Aufbau- und Anlaufphase einer Anlage bis zu 50% Abweichungen zum Planungsstand entstehen können [Nür08]. Bis zu dieser Phase existiert kein Vergleichbares IST, da erst jetzt der Übergang von virtuellen in reale Objekte stattfindet. Die Betriebsmittelrealisierung lässt sich grob in die drei Phasen Anfertigung, Lieferung / Aufbau und Inbetriebnahme unterteilen.

Für Anfertigung, Lieferung und Aufbau ist in der Regel ein externer Anlagenlieferant verantwortlich. Um Know-How-Transfer zu vermeiden werden aus den geplanten 3D-Modellen 2D-Konstruktionszeichnungen abgeleitet und an den Auftragnehmer übergeben. Aus Kostengründen oder wegen sich ändernder Prämissen führen Lieferanten aber auch nach Auftragsannahme noch Änderungen an den übergebenen Konstruktionszeichnungen durch. Dies ist zulässig, sofern die Änderungen den im Lastenheft verankerten Konstruktionsrichtlinien des Auftraggebers entsprechen. Seit einigen Jahren kommen dabei verstärkt Vektor- oder rasterbasierte 2D-Formate zum Einsatz, so dass Zeichnungsmodifikationen im 2D-Plan auch ohne Minderung der Datenqualität möglich sind<sup>8</sup>. Dennoch lassen sich diese geänderten Zeichnungen nicht automatisiert in die 3D-Planung des Auftraggebers zurückführen und werden der Dokumentation lediglich als Änderungszeichnung beigelegt.

### **Realisierung Inbetriebnahme**

Die Anlieferung von verschiedenen Anlagenkomponenten unterschiedlicher Lieferanten (Roboter, Vorrichtungen, Fördertechnik, etc.) erfolgt in einem relativ kurzen Zeitfenster, nach Fertigstellung oder Entkernung der Produktionshalle. Der Aufbau beginnt, sobald die ersten Anlagenkomponenten vor Ort sind. Kommen einzelne Lieferanten in dieser Phase in Verzug oder liefern vom Plan abweichende Betriebsmittel, wird improvisiert und fehlende Elemente werden durch Platzhalter oder verfügbare Alternativen ersetzt. Die Betriebsmittel werden vor Ort verändert; ein fehlender Roboter wird durch ein altes Modell ersetzt. Dadurch wird sichergestellt, dass sich Funktionsprüfungen und Testläufe beim Hersteller nicht durch fehlende Anlagenelemente unnötig verzögern. Sind die Testläufe erfolgreich und kann mit der alternativen Hardware die gewünschte Stückzahl realisiert werden, bleiben die Änderungen bestehen und werden nicht in die Planungsunterlagen zurückgeführt.

Ein weiterer Aspekt, der in der Aufbauphase zu Planabweichungen führt, ist der Anschluss von Betriebsmitteln an die gesamte Medienversorgung (zum Beispiel Elektroanschlüsse, Druckluft, Schmierstoffe und andere flüssige Medien) sowie die Installation von Schutztechnik wie Kabelkanälen, Trittstufen und Ablagen. Obgleich die 3D-Planung für diese Elemente exakt positionierte Modelle vorhält, erfolgt die Installation vor Ort nach eigenem Ermessen des Montagepersonals ohne sich an der Planung zu orientieren. In der Anlagen dokumentation wird dies mit dem Kürzel *OZ* (ohne Zeichnung) festgehalten. Ein Anpassen der Planungsdaten erfolgt nicht.

---

<sup>8</sup> Ein Verlust der Datenqualität bei Zeichnungsänderung war vor Nutzung von Vektor- oder Rasterformaten an der Tagesordnung. Dabei erfolgte die Änderung der Betriebsmittelzeichnung durch Plotten der 2D-Daten, Ändern der Papierzeichnung und anschließendes Scannen der Zeichnung.

## Betrieb

Zwei wesentliche Einflussgrößen für Änderungen einer Produktionsanlage im laufenden Betrieb sind Instandhaltungs- und Optimierungsmaßnahmen.

Instandhaltungsmaßnahmen finden ereignisgesteuert bei Maschinenausfall oder Qualitätsminderung der gefertigten Teile statt. Zur Dokumentation derartiger Änderungen an Betriebsmitteln werden so genannte Betriebsmittelbegleitkarten eingesetzt, die bei einer Änderungsmaßnahme durch den jeweiligen Anwender ergänzt werden. Die im Automobilbau eingesetzten Betriebsmittelbegleitkarten sind in der Regel bereichsbezogen und auf Basis von MS-Excel (seltener auch MS-Access) aufgebaut. Sie sind an die individuellen Bedürfnisse des jeweiligen Anwenders bezogen und haben weder einen einheitlichen Aufbau noch Inhalt. Dies hat zur Konsequenz, dass

- keine einheitlichen Begriffe für gleiche Merkmale und Ereignisse existieren,
- keine bereichsübergreifende Auswertung und Dokumentation der Daten erfolgt,
- die Daten nicht allen Projektbeteiligten zeitnah oder überhaupt zur Verfügung stehen.

Weiterhin finden während der Betriebsphase einer Produktionsanlage laufen Optimierungsprozesse statt. So optimieren sich Mitarbeiter beispielsweise selbstständig ihre Material- oder Werkzeuganstellung in eine „bequemere“ bzw. ergonomischere Position. Weiterhin finden im Serienbetrieb KVP-Workshops<sup>9</sup> zur Steigerung der Anlagen- oder Mitarbeiterproduktivität statt [BH08]. Die Workshopergebnisse werden direkt an der Anlage umgesetzt und nicht in die Planungsdaten zurückdokumentiert.

### 4.2.1.2 Systembedingte Ursachen

In Kapitel 2.3.3 wurden die Charakteristika der Digitalen Fabrik bereits vorgestellt. Der Transfer von Theorie in die praktische Anwendung ist bisher noch nicht in vollem Umfang abgeschlossen. Um Abweichungsursachen aus dem Umfeld der DF aufzuzeigen, werden im Folgenden der derzeitige Umsetzungsstand und aktuelle Herausforderungen in den produzierenden Unternehmen analysiert.

In einer repräsentativen Studie analysierten Spillner et al. den aktuellen Umsetzungsgrad der DF bezüglich der wesentlichen Handlungsfelder Standardisierung, Datenmanagement, Systemintegration und Workflowmanagement [SBR09]. Im Bereich der Standardisierung von Produkten, Prozessen und Musterlösungen ist die Umsetzung am weitesten fortgeschritten, da

---

<sup>9</sup> KVP benennt das Prinzip des Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses, wonach sich Organisationen oder Systeme selbstständig optimieren und weiterentwickeln.

diese eine Grundvoraussetzung für die Einführung von IT-Werkzeugen und Methoden darstellt. Im Bereich des Datenmanagements besteht noch großer Handlungsbedarf hinsichtlich des Änderungsmanagements und der Bestandsdatenpflege. Insbesondere im Bereich der Bestandsdatenpflege existieren keine klar definierten Zuständigkeiten, die eine Pflege der Planungsdaten oder das Rückspiegeln von Betriebsdaten aus der Realität in die digitale Welt regeln. Abschnitt 4.2.1.3 geht ausführlicher auf diese Problematik ein. Weiterführend zeigt sich auffallend starker Handlungsbedarf bei den Schwerpunkten Systemintegration und Workflowmanagement. Zahlreiche Insellösungen im Bereich der Produktionsplanung verhindern bislang einen durchgängigen Datenfluss. Im Gegensatz dazu kommen in den Bereichen der Produktentwicklung und Auftragsabwicklung im Rahmen der DF bereits seit einigen Jahren CAD- und PDM-Systeme sowie PPS- bzw. ERP-Systeme zum Einsatz, welche den Datenfluss in diesen Bereichen durchgängig unterstützen. In der Produktionsplanung existiert jedoch nur wenig softwaretechnische Unterstützung zur Integration der einzelnen Insel-systeme [Sch07]. Daher konzentrieren sich gegenwärtige Bestrebungen und Optimierungsansätze im Umfeld der DF auf die Ausbreitung des Einsatzes von digitalen Werkzeugen auf die Produktionsplanung innerhalb der Produktentstehung. Abbildung 4-9 verdeutlicht vor dem Hintergrund den ursprünglich stärker digital unterstützten Produktentwicklung und der Auftragsabwicklung den geringeren Grad der Softwareintegration in der Produktionsplanung und die derzeitigen Bestrebungen der Softwarelösungsanbieter und auch der Software-anwender, die digitale Unterstützung der Produktionsplanung sinnvoll zu steigern.

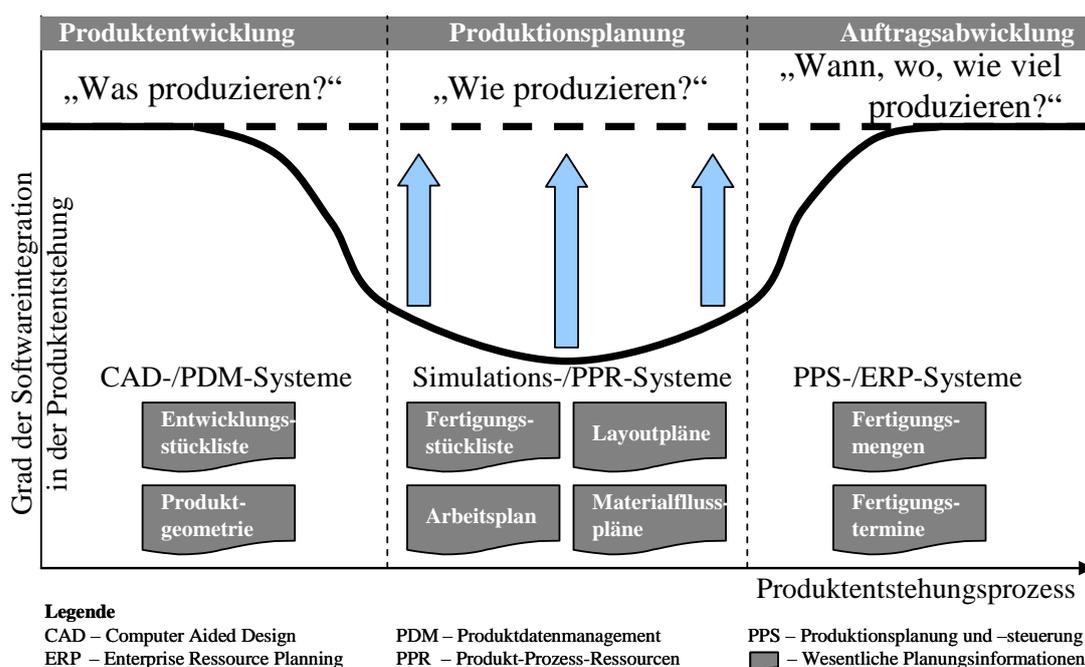


Abbildung 4-9: Grad der Softwareintegration in der Produktentstehung (in Anlehnung an [Sch07])

Softwaresysteme, die die Fertigungs-, die Montage-, die Materialfluss- und die Layoutplanung unterstützen, sind seit etwa Mitte der 1990er Jahre verfügbar. Bullinger und Schweizer beziffern die Anzahl der EDV-Systeme, die ein Projekt im Planungsprozess durchläuft auf circa 50 Einzelsysteme, wobei jede Systemschnittstelle eine Fehlerquelle sein kann [BS06]. Auch an weiteren Stellen in der Literatur wird die heterogene Systemlandschaft der Digitalen Fabrik und die damit verbundene redundante Datenhaltung mit inkonsistenten Modellen als Ursache für fehlerhafte Planungsdaten benannt [BVD+04, SBR09, Sch09, Man09]. Wie Abbildung 4-10 zu entnehmen ist, geht an jedem Übergang zwischen inkompatiblen IT-Systemen ein Teil der im Vorfeld erzeugten Informationen und somit auch ein Teil des zuvor generierten Wissens verloren.

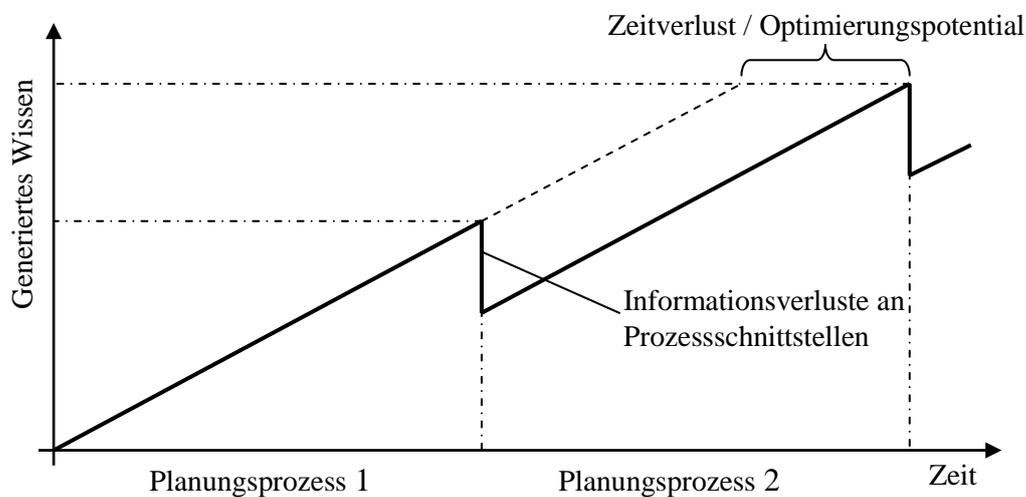


Abbildung 4-10: Informationsverluste an Prozessschnittstellen nach [BVD+04]

Das verlorene „Wissen“ muss in der Regel in manuellen, zeitaufwendigen Prozessen wiederhergestellt werden. Darüber hinaus entstehen durch die parallele Weiterverarbeitung von abgelieferten Planungsdaten in verschiedenen Fachbereichen voneinander abweichende Varianten.

So ist die integrierte Verwendung von Planungsdaten gegenwärtig eine der größten Herausforderungen im Bereich der DF. Durch die Softwareunterstützung in der Produktionsplanung fallen weitere Daten an, die ergänzend zu den Produktdaten verwaltet und gesteuert werden müssen. Da PDM-Systeme von ihrer Konzeption her diese Anforderungen ausschließlich für Produktdaten leisten können, werden derzeit so genannte Prozessplanungswerkzeuge weiterentwickelt und in der Praxis eingesetzt. Diese sollen über den gesamten Produktentstehungsprozess PPR-Daten in der stets aktuellen Version zur Verfügung stellen. Dies schließt die Verknüpfung der virtuellen Produktion (Planungsphase) mit der realen Produktion ein, da

zukünftig beispielsweise die Virtuelle Inbetriebnahme und die Rückführung von Betriebsdaten in die Planung bedeutender sein werden als heute. Ebenso stellt die Verzahnung des Produktentstehungsprozesses mit dem Auftragsabwicklungsprozess eine Teilaufgabe dar, wofür zukünftig offene Systemlösungen mit entsprechenden Schnittstellen erforderlich sind.

Neben den genannten technischen Herausforderungen, denen in Zukunft durch die Weiterentwicklung von Softwarelösungen der DF begegnet wird, existieren auch Herausforderungen, die sich nicht durch den Einsatz besserer Softwarewerkzeuge lösen lassen. So unterliegt die reale Fabrik während des Betriebes einer gewissen Dynamik, welche sich nicht in der DF abbilden lässt. Claussen führt dazu aus, dass das reale Verhalten eines Fabriksystems generell nicht prognostizierbar ist, da der den Technologien und Systemen der DF zugrunde liegende Determinismus in der Realität nicht auftritt. Vielmehr existieren in der realen Fabrik Kopplungseffekte zwischen technischen und sozialen Systemen einerseits und der Umwelt andererseits, was zu zunehmenden Abweichungen der Modelle der DF führt [Cla09].

### 4.2.1.3 Soziologische Ursachen - „Bereichsdenken“

In Kapitel 2.2.4 wurden die Planungsaufgaben und deren Teilumfänge im Rahmen der Produktionsplanung bereits vorgestellt (vergleiche Abbildung 2-13, Seite 30). Die Durchführung komplexer Planungsprojekte im Automobilumfeld ist nur durch die Kooperation verschiedener Unternehmensbereiche möglich. So wird zur Planung und Inbetriebnahme der Fertigungszellen einer Untergruppe ein Projektteam zusammengestellt, das sich aus Vertretern der Fachbereiche Fertigungsplanung, Betriebsmittelkonstruktion, Robotik/Simulation und Elektro-/Steuerungstechnik zusammensetzt. Die Anfertigung der einzelnen Anlagenkomponenten wird teilweise intern, teilweise von externen Dienstleistern durchgeführt.

Aus dieser bereichsübergreifenden Zusammenarbeit ergeben sich spezielle organisatorische Herausforderungen. So existieren derzeit zahlreiche **heterogene**, bereichsspezifische **Planungsmethoden**.

Beispielsweise stehen den im Rohbauplanungsprozess involvierten Fachbereichen zur Durchführung der einzelnen Planungsaktivitäten neben einer Vielzahl unterschiedlicher IT-Werkzeuge (vgl. Kapitel 4.2.1.2) auch einige bereichsspezifische „Methodenhandbücher“ zur Verfügung. Diese recht allgemein gehaltenen technischen Methodenbeschreibungen beziehen sich dabei sowohl auf Neu- als auch auf Änderungsplanungen und liegen in Form von Verfahrensanweisungen und Handlungsrichtlinien vor. Einige Planungsaufgaben werden demnach „vom Groben ins Feine“ abgearbeitet (Zellenkonzept, Roboterprogrammierung etc.), anderen liegt hingegen ein klassischer Bottom-Up-Ansatz zugrunde. Als Beispiele hierfür sind die

Vorgehensweise innerhalb der Vorrichtungskonstruktion sowie das Erstellen und Testen von Steuerungsprogrammen zu nennen. Darüber hinaus existieren zwar einige weiterführende Aufgabenbeschreibungen; jedoch sind diese zum einen stets bereichsbezogen und lassen dem Anwender zum anderen aufgrund ihrer allgemeinen Inhalte einen großen Handlungsspielraum offen. Ein standardisiertes, durchgängiges und bereichsübergreifendes Planungsvorgehen existiert bis heute nicht. So können wichtige Synergieeffekte nicht erschlossen werden. Zeitaufwendige Rücksprachen sowie kostspielige Missverständnisse sind die Folge.

Darüber hinaus erschweren **unklare Zuständigkeiten** die Zusammenarbeit von unterschiedlichen Bereichen erheblich. Im Speziellen ist der Umfang von Konstruktionsdatenständen aus der Fahrzeugentwicklung zu wichtigen Meilensteinen wie Vorserienfertigung, Null-Serie oder Produktionsstart nicht explizit festgelegt.

In den Lastenheften der Produktionsplanung sind Zertifizierung-, Verifikations- und Dokumentationsprozesse für die Anlieferung von Betriebsmitteln mittlerweile enthalten, benennen jedoch keine explizite Methode, mit der diese Prozesse in einheitlicher Form durchzuführen sind. Darüber hinaus werden falsche oder fehlende Messberichte und Dokumentation nicht mit Vertragsstrafen geahndet, da derartige Berichte durch den Betreiber auch nicht auf Korrektheit geprüft werden. Insbesondere im Bereich der Bestandsdatenpflege existieren keine klar definierten Zuständigkeiten. Dies betrifft nicht nur die Planungsdaten, sondern auch die Rückspielung der Betriebsdaten aus der Realität in die digitale Welt. Hier ergibt sich ein Zielkonflikt, da die Pflege der Bestandsdaten häufig im ersten Schritt keinen Nutzen für den Verantwortlichen mit sich bringt [SBR09]. Erst die Verwendung dieser Daten für einen nachfolgenden Planungsprozess liefert den erwünschten Vorteil. Dies lässt sich nur erreichen wenn alle Verantwortungsbereiche von Hallenbau, Planung, Anlagenbau, Produktion/Betreiber, Fördertechnik, Elektrik und Instandhaltung für eine Datenpflege nach der Digitalisierung und die regelmäßige Rückdokumentation von Änderungen sensibilisiert werden [Nür08].

Bei der Analyse soziologischer Ursachen wurden bereits heterogene Methoden und unklare Zuständigkeiten als Abweichungsursachen identifiziert. Die meisten Abweichungen lassen sich jedoch auf simple **Kommunikationsprobleme** zwischen den beteiligten Personen bzw. Organisationseinheiten zurückführen. Zu diesem Ergebnis kommt eine Studie, die im Rahmen des BMBF-Projekts „Ramp-Up/2“ durchgeführt wurde [DA06]. Demnach sind bis zu 40 Prozent aller Anlaufprobleme bei der Inbetriebnahme auf Missverständnisse, unzureichende Absprachen und bereichsübergreifende Kommunikationsprobleme zurückzuführen. Hierbei ist es wichtig, die Organisation von Planungsbeteiligten als soziales System zu verstehen, das

im Rahmen eines Planungsprojektes aus vielen Teilsystemen gebildet wird. Jedes Teilsystem besitzt eigene Sinn-, Sprach- und Verstehenswelten und lässt sich seinerseits weiter in Teilsysteme aufgliedern [Cla09]. Generell ist ein durchgängiges Verständnis zur Sinnhaftigkeit der Werkzeuge und Prozesse aller Beteiligten Voraussetzung für die nachhaltige Verwendbarkeit der Ergebnisse der eingesetzten Softwarewerkzeuge.

Am Beispiel der Planung der Technischen Gebäudeausrüstung des BMW-Werkes in Leipzig ist dies nachzuvollziehen [Cla09]: Die mit CA-Methoden erarbeitete Planung zur Trassen- oder Einzelleitungsverlegung beschreibt den geometrischen Verlauf mit Toleranzen von +/- 30mm. Bei Mitarbeitern der beauftragten Firmen und deren Subunternehmern besteht jedoch eine langjährige Tradition, Leitungen nach dem Kriterium der Arbeitseffizienz zu verlegen. Dabei sind Abweichungen von +/- 500 mm keine Seltenheit, was zu Planabweichungen und Kollisionen in der Realisierungsphase führte. Der Sinn einer exakten Einhaltung von Prämissen und Toleranzen ist in der vielfach gestaffelten Kette von beteiligten Unternehmen und Subunternehmen auch mit großem Aufwand nur schwer und teilweise auch gar nicht vermittelbar. Aus der Perspektive der Systemtheorie kann dies damit erklärt werden, dass hier viele nur sehr lose gekoppelte Einzelsysteme mit jeweils eigener Identität und Sinnstruktur agieren.

### **4.2.1.4 Zusammenfassung**

Die Abweichungen entspringen unterschiedlichen Ursachendomänen. Einige von ihnen, insbesondere die system- und schnittstellenbedingten sowie organisatorischen Ursachen, lassen sich mit entsprechendem Entwicklungs- und Organisationsaufwand abstellen. Ursachen, mit Wurzeln im soziologischen Bereich, stellen Herausforderungen an die Wissenschaftsdomänen von Arbeitspsychologie und intersozialer Kommunikation [SBLM09]. Die Lösungsfindung und der anschließende Transfer in den Produktentstehungsprozess sind gegenwärtig nicht prognostizierbar. Damit kann der Problemstellung dieser Arbeit nicht nur kurz- und mittelfristig, sondern auch langfristig eine maßgebliche Relevanz bei der Optimierung von Produktionsplanungsprozessen bescheinigt werden.

### **4.2.2 Kategorisierung geometrischer Abweichungen**

Kapitel 2.4.1 führt an, dass jede modellierte Eigenschaft eines Betriebsmittels abweichen kann. Der Fokus in den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit liegt auf der Identifikation geometrischer Abweichungen von Betriebsmitteln oder Betriebsmittelelementen. Das digitale Planungsmodell wird in diesem Zusammenhang als SOLL bezeichnet, wohingegen die realen Betriebsmittel den IST-Stand der Produktionsumgebung widerspiegeln.

Aus dem Grundverständnis des Vorhandenseins von Materie in einem definierten Raum ergeben sich die beiden elementaren Zustände „Materie vorhanden“ und „Materie nicht vorhanden“. Daraus lassen sich die beiden folgenden elementaren Abweichungsarten ableiten:

- Fehl-IST: im digitalen Modell geplante Umfänge sind in der Realität nicht vorhanden.
- Fehl-SOLL: In der Realität vorhandene Objekte werden nicht durch das digitale Objektmodell abgebildet.

Treten diese elementaren Geometrieabweichungen kombiniert auf lässt sich aus dem Kontext des betrachteten Objekts ein semantischer Zusammenhang zwischen ihnen ableiten. Ist ein reales Bauteil beispielsweise im Modell vorhanden, jedoch an einer vom Modell abweichenden Position montiert, so ist dies eine semantische Kombination der beiden oben beschriebenen Abweichungsarten. Das Fehl-IST existiert am realen Objekt an der Stelle, an der das Bauteil im digitalen Modell positioniert ist, während eine Fehl-SOLL-Abweichung an entsprechender Position im digitalen Modell zu erkennen ist.

Die Bezeichnung einer derartigen Kombination als „Positionsabweichung“ ist für den Anwender greifbarer als die Beschreibung der einzelnen Elementarabweichungen. Eine weitere Variante von Abweichungen ergibt sich, wenn sich diese nicht auf das Vorhandensein und/oder die Positionierung von Bauteilen in einer Baugruppe beziehen, sondern innerhalb eines Bauteils auftreten. Diese Spielart wird allgemein als „Gestaltabweichung“ bezeichnet. Die vier vorgestellten Abweichungskategorien werden nachfolgend anhand von Beispielen erläutert.

### 4.2.2.1 Fehl-IST

Abbildung 4-11 zeigt ein Beispiel einer Fehl-IST-Abweichung. Im linken Teil der Abbildung ist die reale Geometrie eines Spanners einer Karosseriebauvorrichtung zu erkennen, während im rechten Abbildungsteil die kongruent überlagerten Konstruktionsdaten desselben Spanners dargestellt sind.

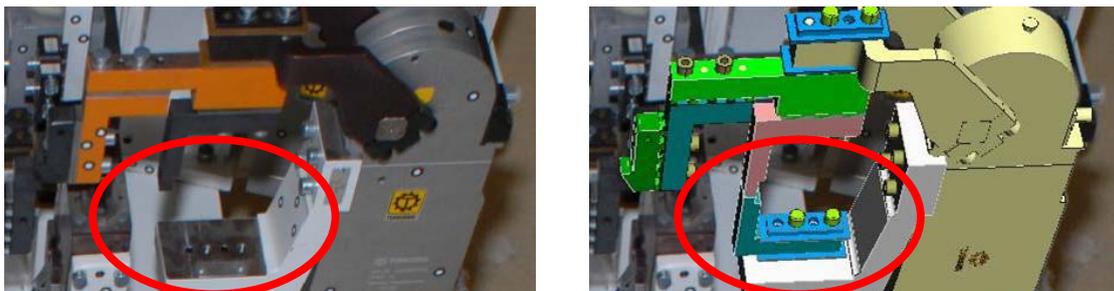


Abbildung 4-11: Fehl-IST: Im 3D-Modell vorhandene Auflage (blaues Objekt, rechtes Bild) ist in der Realität (linkes Bild) nicht vorhanden [eigene Aufnahme]

Im markierten Bereich des rechten Bildes befindet sich eine blau modellierte, als Winkel ausgeführte Blechauflage, die in der Realität nicht vorhanden ist. Die Auflage ist weder in einer anderen Ausführung, noch an einer abweichenden Position installiert, so dass es sich hierbei um eine klassische Fehl-IST-Abweichung handelt.

### 4.2.2.2 Fehl-SOLL

Ein Beispiel für fehlende Konstruktionsdaten tritt an derselben Vorrichtung auf und ist in Abbildung 4-12 dargestellt. In diesem Fall befindet sich auf der Vorrichtung Grundplatte ein Kabelkanal aus grauem Stahlblech (im linken Bild), der im Vorrichtungmodell augenscheinlich nicht vorhanden ist. Dies ist eine typische Situation bei Karosseriebaubetriebsmitteln, da sämtliche Elemente der Medienversorgung ohne Zeichnung nach dem Anlagenaufbau installiert werden. Eine Rückdokumentation der installierten Medienversorgung in das 3D-Modell findet in der Regel nicht statt.

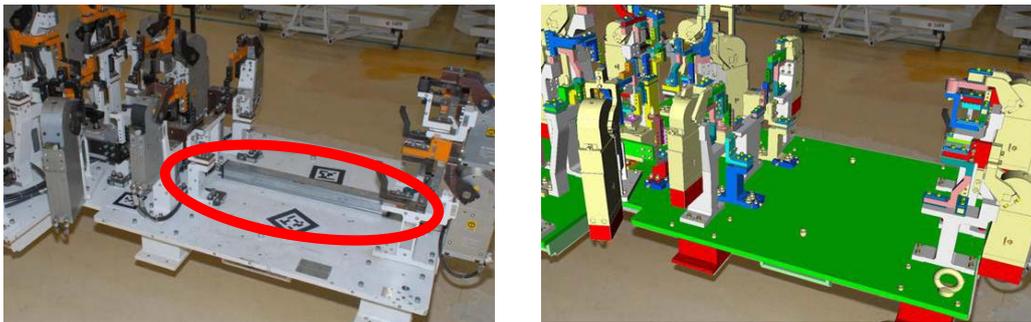


Abbildung 4-12: Fehl-Soll: Ein reales Objekt (grauer Kabelkanal im rechten Bild) ist im 3D-Datensatz nicht modelliert [eigene Aufnahme]

### 4.2.2.3 Positionsabweichung

Ein eingehendes Beispiel für eine Positionsabweichung findet sich in Abbildung 4-13 bei der technischen Gebäudeausstattung einer Karosseriebauhalle in Form einer Regenleitung.



Abbildung 4-13: Positionsabweichung: modellierte Wasserleitung (re) versetzt installiert [eigene Aufnahme]

Die installierte Regenleitung, als weißes Rohr im linken Bild zu erkennen, hat einen Versatz von ca. 1,5 Meter gegenüber ihrem geplanten Verlauf. Dieser ist an der blau modellierten virtuellen Regenleitung im rechten Bild zu erkennen. Positionsabweichungen dieser Art entstehen zumeist in der Aufbauphase und werden immer dann festgestellt, wenn an der gleichen Stelle die Installation eines anderen Objekts zu einem späteren Zeitpunkt geplant ist. Der potenziell folgende Umbau führt nicht selten zur Verzögerung des gesamten Produktionsanlaufs.

#### 4.2.2.4 Gestaltabweichung

Abbildung 4-14 zeigt einen Teil der Karosseriebauvorrichtung, die bereits aus Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 bekannt ist. Neben den gezeigten Fehl-IST- und Fehl-SOLL-Abweichungen weist sie auch eine Gestaltabweichung auf. Diese ist an einer Konsole festzustellen, deren 3D-Modell als Vollkörper konstruiert ist, während sich im realen Konsolenfuß eine Aussparung befindet.

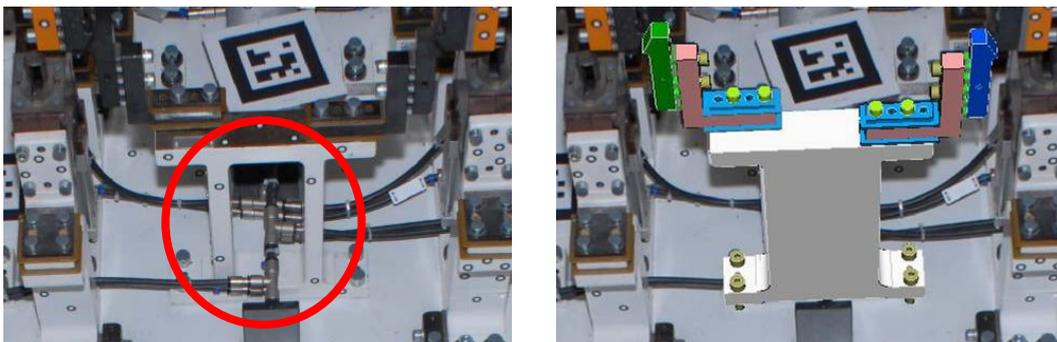


Abbildung 4-14: Gestaltabweichung: Der Konsolenfuß einer Spannvorrichtung ist als Vollkörper modelliert (rechts im Bild), in der Realität jedoch mit einer Aussparung ausgeführt [eigene Aufnahme]

Die offene Ausführung ermöglicht nicht zuletzt die Installation des in Abbildung 4-12 dargestellten Kabelkanals, da dieser mit einer Konsole ohne Aussparung kollidieren würde. An diesem kleinen Beispiel ist eine Fehlerfortpflanzung aufgrund abweichender Planungsmodelle zu erkennen. Wäre der erwähnte Kabelkanal bei der Betriebsmittelkonstruktion berücksichtigt worden, so hätte der Konstrukteur bereits früh die Kollision zwischen Kabelkanal und Konsole festgestellt und dadurch beide Abweichungen beseitigt.

#### 4.2.2.5 Fazit

Eine eindeutige Zuordnung zu einer Abweichungskategorie ist schwierig für den Anwender. Es besteht ein gewisser Interpretationsspielraum, welcher stark von der Kenntnis um die Zusammenhänge des untersuchten Objektes/Betriebsmittels zu dessen Umfeld beeinflusst wird. So wird schnell eine Fehl-IST-Abweichung vermutet, obwohl das „vermisste“ Element vorhanden ist, jedoch anders ausgeführt oder abweichend positioniert wurde.

Die Einteilung von Abweichung in die vier oben genannten Kategorien empfiehlt sich explizit bei der Bewertung geometrischer Abweichungen. Zur Analyse weiterer Betriebsmitteleigenschaften (Temperatur, Druck, Geschwindigkeit, Material, Oberflächenbeschaffenheit, Farbe, Taktzeit, etc.) ist das Erarbeiten spezifischen Kategorien für die analysierte Objekteigenschaft notwendig.

### 4.3 Prozessbeschreibung: Soll/Ist-Vergleich mit Augmented Reality

Zur Durchführung eines AR-basierten Soll/Ist-Vergleichs sind vier wesentliche Eingangsgrößen notwendig [PBDM07]:

- Soll-Daten (3D-Modelle der zu vergleichenden Objekte)
- Ist-Daten (Fotos, Videodateien oder -streams)
- Trackinginformationen (Registrierung des AR-Systems und aktuelle Kamerapose)
- Systemspezifische Informationen (Kamerakalibrierung, Systemkalibrierungen, ...)

Diese Informationen ermöglichen das Erstellen eines AR-Szenarios, in dem der Anwender Abweichungen zwischen Soll und Ist untersuchen und dokumentieren kann. Vor der Ist-Aufnahme und Registrierung sind einige organisatorische Arbeiten zu erledigen, die an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben sollen. Abbildung 4-15 zeigt den möglichen Ablauf der einzelnen Prozessschritte eines Soll/Ist-Vergleichs mit Augmented Reality.



Abbildung 4-15: Prozessschritte für einen AR-basierten Soll/Ist-Vergleich [eigener Entwurf]

Die Reihenfolge der Informationsbeschaffung ist von der Untersuchungsstrategie abhängig. Hier wird zwischen den beiden Strategien der Online- und Offlineauswertung unterschieden.

Die **Online-Auswertung** entspricht der klassischen AR-Definition nach Azuma [vgl. Azu97], wonach der Anwender in Echtzeit mit der dreidimensional registrierten AR-Umgebung interagiert. Voraussetzung hierfür ist, dass alle vorbereitenden Prozesse (Kamerakalibrierung, Systemkalibrierungen, Datenbeschaffung und -aufbereitung, Registrierung) stattfinden und abgeschlossen sind, bevor die Erfassung der Ist-Daten ( Bilddaten der Realität und Trackinginformationen) erfolgt. Die Auswertung erfolgt während der Datenaufnahme am Ort der Untersuchung. Die Online-Auswertung bietet den großen Vorteil, dass erkannte Abweichungen sofort

eingehend untersucht und mit dem eingesetzten Trackingsystem ggf. direkt vermessen werden können. Nachteile sind die lange Einsatzdauer am Untersuchungsort sowie die fehlende Möglichkeit Eingangsparameter im Nachhinein zu variieren (z.B. andere 3D-Daten zu überlagern).

Die Strategie der **Offline-Auswertung** entkoppelt den Auswerteprozess von der Aufnahme der Ist-Daten. Das ermöglicht die Datenaufnahme durchzuführen noch bevor 3D-Daten vorhanden sind oder eine Kamerakalibrierung durchgeführt wurde. Diese Vorgehensweise ist besonders bei Szenarien sinnvoll in denen Soll/Ist-Vergleiche während des Produktionsbetriebs durchgeführt werden sollen, so dass zur Datenaufnahme nur kurze Zeitfenster zur Verfügung stehen. Die Vorteile dieser Methode sind die zeitliche Unabhängigkeit von Ist-Aufnahme und anderen vorbereitenden Tätigkeiten, die kurze Einsatzdauer in der realen Produktionsumgebung, sowie die Wiederholbarkeit der Auswertung mit gleichen oder veränderten Eingangsparametern. Nachteilig wirkt sich jedoch die eingeschränkte Interaktion mit der AR-Szene aus. Eine freie Navigation durch die Szene ist nicht möglich, so dass bei der Auswertung fehlende Ansichten und Perspektiven nicht ergänzt werden können.

Vorbereitende Prozessschritte sind zeitlich unabhängig voneinander durchführbar. Aus Sicht eines generellen Prozessmodells spielt es keine Rolle, ob zunächst die 3D-Modelle aufbereitet oder Systemkalibrierungen durchgeführt werden. Eine sinnvolle Reihenfolge ergibt sich erst aus der Kenntnis des konkreten Anwendungsszenarios und der Konfiguration des eingesetzten AR-Systems. Die nachfolgende Reihenfolge der Beschreibung einzelner Prozessschritte kann daher nur als Empfehlung, nicht aber als Prozessdefinition verstanden werden.

#### **4.3.1 Organisatorische Vorbereitung**

Die vorangegangenen Ausführungen vermitteln einen Eindruck der Komplexität von Fertigungsplanungs- und Produktionsprozessen im Karosseriebau. Durch die Beteiligung mehrerer Fachbereiche entstehen während der Planung verschiedene, mitunter voneinander abweichende, Datenstände mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Vor dem Vergleich ist zu klären, welcher Datenstand für weitere Planungsmaßnahmen zugrunde gelegt und somit abgeglichen werden soll. Neben der Produktionsplanung ist es notwendig einen Mitarbeiter der Serienplanung in die organisatorische Vorbereitung mit einzubeziehen. In aller Regel findet die Integrationsplanung eines Betriebsmittels in einer Phase statt, in der das Betriebsmittel noch zur Fertigung eines anderen Produkts eingesetzt wird. Da die Betriebsmittel beim Soll/Ist-Vergleich zugänglich sein müssen, während des laufenden Betriebes jedoch nicht betreten werden dürfen, ist mit der Serienplanung ein geeignetes Zeitfenster abzustimmen.

Neben dem Stillstand des Produktionsbetriebes sollte zu diesem Termin ein Mitarbeiter der Serienfertigung als Unterstützung beim Soll/Ist-Vergleich zur Verfügung stehen. Dieser kann die Zugänglichkeit von Referenzpunkten bzw. -elementen an den Betriebsmitteln sicherstellen, welche nicht selten verdeckt oder verbaut sind. Weiterhin ist es notwendig den im Planungsmodell dokumentierten Zustand aller beweglichen Betriebsmittelkomponenten herzustellen. Hierzu gehören das Öffnen oder Schließen von Spannelementen sowie das Verfahren von Robotern in deren Nullposition.

Letztendlich sind bei der Planung eines Soll/Ist-Vergleichs die geltenden betrieblichen Vorschriften des jeweiligen Betriebes zu berücksichtigen. Neben dem Tragen vorgeschriebener Arbeitssicherheitsbekleidung gilt in vielen Produktionsstätten ein striktes Film- und Fotografierverbot. Im Vorfeld einer Untersuchung ist daher eine entsprechenden Film- und Fotografieregenehmigung zu beschaffen.

### **4.3.2 Datenbeschaffung**

Zur Durchführung des Soll/Ist-Vergleichs werden die 3D-Modelle, welche den Soll-Zustand eines Objekts beschreiben, benötigt. Je nach Modellart (Standardbetriebsmittel, Sonderkonstruktionen, Technische Gebäudeausstattung, Gebäudeelemente, u. a.) werden diese in spezifischen Datenbanken und Planungswerkzeugen vorgehalten, welche nach Definition das Systemnetzwerk der Digitalen Fabrik bilden (vgl. 2.3.1). Der aktuelle Umsetzungsgrad der Digitalen Fabrik offenbart bislang noch starken Handlungsbedarf bei der Integration aller DF-Werkzeuge in ein durchgängiges Datenmanagement zur Produkt-, Prozess- und Ressourcenplanung (vgl. 4.2.1.2). Ein Zugriff auf benötigte 3D-Modelle über ein durchgängiges EDM-System kann daher nicht generell vorausgesetzt werden. Oft ist es notwendig 3D-Modelle direkt aus den generierenden Systemen (CAD, CAP, ERP, PPR, u. a.) zu exportieren.

Aufgrund der zunehmenden Standardisierung im Planungsprozess bei Automobilherstellern [SBR09] ergibt sich dabei eine weitere Herausforderung. Heute werden nahezu alle Betriebsmittel als Elemente von Planungsbibliotheken zur Verfügung gestellt. Aus Gründen der Redundanzvermeidung werden diese Bibliothekselemente bei der Planung als Referenz instanziiert. Die Eigenschaften (z.B. Positionierung) von Referenzobjekten sind in projektspezifische Planungsdatenbanken hinterlegt. Daraus ergibt sich die in Abbildung 4-16 dargestellte Herausforderung verschiedene Strategien der Beschaffung von 3D-Modellen aus den Systemen der Digitalen Fabrik zu beherrschen. Lassen sich Modelle beispielsweise nur ohne Transformationsinformationen exportieren, so müssen diese separat aus den entsprechenden

Datenbanken ausgelesen und im Nachgang mit dem Modell verknüpft werden. Komfortabler ist der direkte Export transformierter Modelle aus einem übergeordneten System wie z.B. einem PPR-Werkzeug.

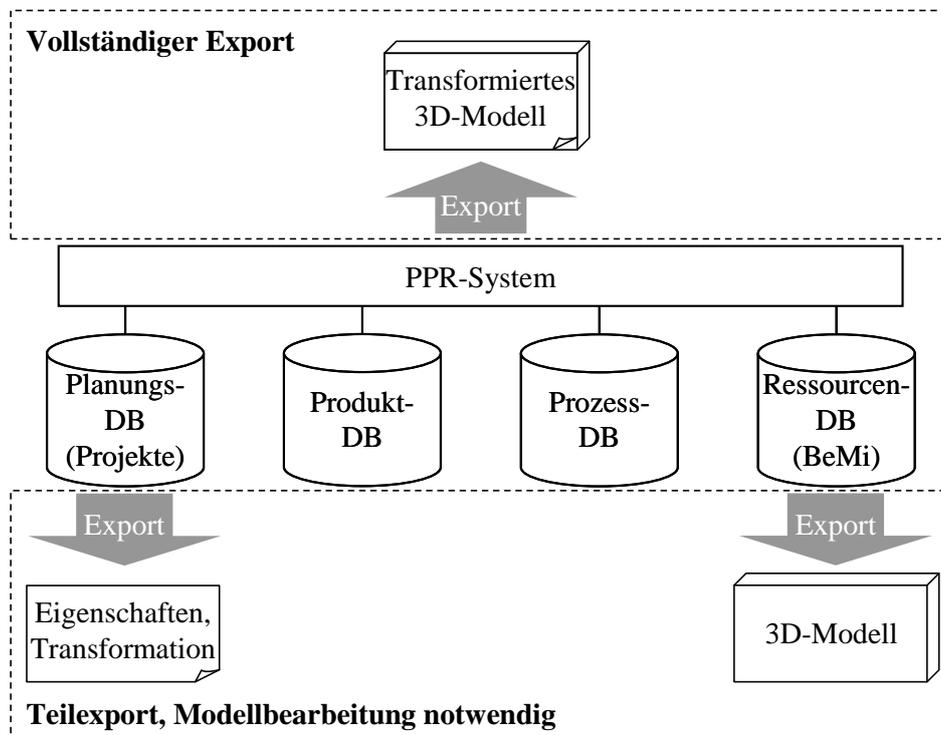


Abbildung 4-16: Varianten des Modellexports am Beispiel eines PPR-Systems [eigener Entwurf]

Neben der Datenbereitstellung ist die Darstellung großer Datenmengen bei heute verfügbaren AR-Systemen noch nicht zufriedenstellend gelöst (vgl. Kapitel 3.3). Um dennoch einen performanten Einsatz zu gewährleisten, werden die 3D-Modelle nach dem Export mit Hilfe von Geometrieeditoren aufbereitet. Oft findet eine Konvertierung in reine Geometrieformate (z. B. VRML, STL, JT), so dass nicht benötigte Modellfeatures entfallen. Zur Datenreduzierung dienen darüber hinaus das Herabsetzen der Tessellierung sowie eine Entkernung<sup>10</sup> der Geometriemodelle.

Die Datenbeschaffung endet nicht immer mit der Modellreduzierung. Speziell im Bereich der Fertigungsplanung gibt es Sonderfälle, die zusätzlichen Aufwand bei der Modellaufbereitung erfordern. Ein Beispiel hierfür ist die Spiegelung von Modellen oder Teilmodellen bei Fertigungsanlagen, welche einen symmetrischen Aufbau besitzen. Für die Prozesssimulation in der Planung ist dann die Modellierung einer Anlagenhälfte ausreichend, da die Prozesse in der Anlage links- und rechtsseitig parallel ablaufen. Dementsprechend liegen auch nur Modelle für eine Anlagenseite vor. Für einen Soll/Ist-Vergleich aller Betriebsmittel ist es notwendig

<sup>10</sup> Nicht sichtbare Geometrieelemente im Modellinneren werden entfernt.

alle nur einseitig vorhanden Objekte entlang der Symmetrieachse der Anlage zu spiegeln. Die Spiegelung bezieht sich sowohl auf die Objektposition innerhalb der Anlage als auch auf die Spiegelung der Objektgeometrie. Einige Betriebsmittelobjekte erlauben jedoch nur eine gespiegelt Positionierung in der Anlage, jedoch keine Spiegelung ihrer Geometrie. Zu diesen Objekten zählen Industrieroboter. Der Roboterkörper ist standardisiert und kann nicht gespiegelt aufgebaut werden. Im Einzelfall liefert die Betriebsmittelplanung Informationen darüber, ob die geometrische Spiegelung eines Betriebsmittelmodells zulässig ist.

### 4.3.3 Systemkalibrierung

Bei der Arbeit mit optischen Erfassungssystemen wird das mathematische Modell der Zentralprojektion<sup>11</sup> für die Beschreibung technischer Sachverhalte zugrunde gelegt. Dabei wird die Kamera als räumliches System angesehen, das aus der ebenen Bildfläche (Film, Bildsensor) und dem davor angebrachten Objektiv mit dem Projektionszentrum besteht [Luh03]. In realen optischen Abbildungssystemen existieren jedoch physikalisch bedingte Verzeichnungen, die zu Abweichungen vom mathematischen Modell führen. Von optischer Verzeichnung (oder Distorsion) wird gesprochen, wenn ein Gegenstand nicht über das gesamte Bildfeld geometrisch gleich, sondern an den Bildrändern verzerrt wiedergegeben wird. Die verursachenden physikalischen Effekte sind im Wesentlichen die radial-symmetrische, die radial-asymmetrische und tangentiale Verzeichnung sowie Affinität und Scherung [WCH92]. Unberücksichtigt führen diese Verzeichnungen zu Genauigkeitsdefiziten. Jedoch lassen sie sich durch Korrekturterme mathematisch beschreiben [Bör04], wodurch sich Ungenauigkeiten ausgleichen lassen. Durch eine optische Kalibrierung lassen sich die Verzeichnungsparameter und somit die Korrekturterme der verwendeten Kameraoptik bestimmen. Ferner bedingt der Einsatz verschiedener Trackingsysteme einen Kalibriervorgang, um Transformationen zwischen Trackingtargets und dem Kamerasystem zu bestimmen (vgl. Kapitel 4.3.4). Unter der Voraussetzung dass die Systemparameter (Verzeichnungsparameter bzw. Verbindung von Trackingtarget und Kamera) nicht verändert werden, können die Kalibrierungen sowohl vor als auch nach der Untersuchung erfolgen, sofern die Auswertung Offline erfolgt. Aufgrund der nicht nachgewiesenen Langzeitstabilität beider Kalibrierungen im industriellen Einsatzumfeld sollten sie jedoch zeitnah zur durchgeführten Untersuchung stattfinden. Beide Kalibrierungen werden im Folgenden erläutert.

---

<sup>11</sup> Die Zentralprojektion ist ein mathematisch definiertes Verfahren zur Abbildung dreidimensionaler Objekte auf eine zweidimensionale Bildebene.

#### 4.3.3.1 Optische Kamerakalibrierung

Die Bestimmung von Verzeichnungsparametern lässt sich im Labor unter fest definierten Bedingungen durchführen. Bekannte Methoden hierfür sind Goniometer- und das Kollimatorverfahren<sup>12</sup>. Diese Verfahren haben jedoch folgende Nachteile:

- Der apparative ist Aufwand sehr groß.
- Die innere Orientierung der verwendeten Kameras ist im Allgemeinen nicht stabil, was eine Nachkalibrierung in regelmäßigen Abständen erforderlich macht.
- Die innere Orientierung einschließlich Verzeichnung ändert sich bei unterschiedlichen Fokussierungen und Blendeneinstellungen.

Daher ist eine Kalibrierung unter Einsatzbedingungen sinnvoller. Zur Kalibrierung einzelner Bildaufnahmesysteme existieren bewährte Verfahren, die ausschließlich Bildinformationen nutzen. Hierzu wird eine Kalibrierplatte mit einem Referenzfeld von bekannten Passpunkten aus verschiedenen Perspektiven formatfüllend aufgenommen. Durch eine photogrammetrische Bündelblockausgleichung werden für jeden im Bild gemessenen Passpunkt zwei Beobachtungsgleichungen aufgestellt, aus denen ein nichtlineares Gleichungssystem gebildet wird. Damit ist die Berechnung der unbekanntenen Verzeichnungsparameter möglich. Mit zusätzlichen Objektinformationen über das Punktfeld lässt sich die Genauigkeit des in [God02] beschriebenen Verfahrens noch steigern. Am Markt sind diverse Systeme verfügbar, mit denen eine optische Kalibrierung auf Basis eines Bündelblockausgleichs durchführbar ist. Oft werden diese Systeme mit einer Kalibrierplatte ausgeliefert, auf der ein hochgenau vermessenes Referenzpunktfeld abgebildet ist. Aufgrund der kleinen Abmessungen verfügbarer Kalibrierplatten wird die Kamerakalibrierung in der Regel mit einem kleinem Kameraabstand vorgenommen. Da eine qualitativ gute Kamerakalibrierung nur mit scharf fokussierten Bildern und fixer Kamerabrennweite möglich ist, liegt der Kamerafokus somit im Nahbereich. Eine so durchgeführte Kamerakalibrierung ist für Aufnahmen sinnvoll, bei denen Objekte abgebildet werden, die sich in etwa in derselben Arbeitsentfernung befinden, wie die Kalibrierplatte zum Zeitpunkt der Kalibrierung. Andere Aufnahmeabstände führen zu unscharfen Aufnahmen (vgl. Kapitel 5.3.3).

---

<sup>12</sup> Hierbei wird in der Bildebene einer Kamera eine Platte mit einem hochgenauen Gitter angebracht. Mit einem Goniometer (Winkelmesser) werden von der Objektseite her die Gitterpunkte angezielt und die entsprechenden Winkel bestimmt. Aus einem Soll/Ist-Vergleich lassen sich Werte für die Verzeichnung ermitteln.

Beim Kollimatorverfahren können von mehreren, in definierten Winkeln zueinander angeordneten Kollimatoren (Gerät zur Erzeugung eines parallelen Strahlenverlaufs), Testfiguren auf die Bildebene projiziert werden. Auch hier lassen sich die Parameter der inneren Orientierung durch einen Soll/Ist-Vergleich ermitteln, allerdings nur für auf „unendlich“ fokussierte Kameras [God02].

### 4.3.3.2 Target-Kamera-Kalibrierung

Bei der Verwendung eines externen Trackingsystems, welches die Pose der Kamera im Weltkoordinatensystem bestimmt, ist es notwendig die Transformation zwischen Trackingtarget und Kamerakoordinatensystem zu bestimmen (vgl. Abschnitt 4.3.4). In der Regel ist in diesem Fall ein Trackingtarget fest an der Kamera montiert. Die stabile Transformation zwischen beiden wird in einem Kalibriervorgang ermittelt, der im Folgenden als Target-Kamera-Kalibrierung bezeichnet wird<sup>13</sup>.

Abbildung 4-17 veranschaulicht die Beziehungen der am Kalibriervorgang beteiligten Koordinatensysteme. Die im Bild grau dargestellten Transformationen beziehen sich auf die weiter unten beschriebene Registrierung und sind für diesen Kalibriervorgang nicht relevant.

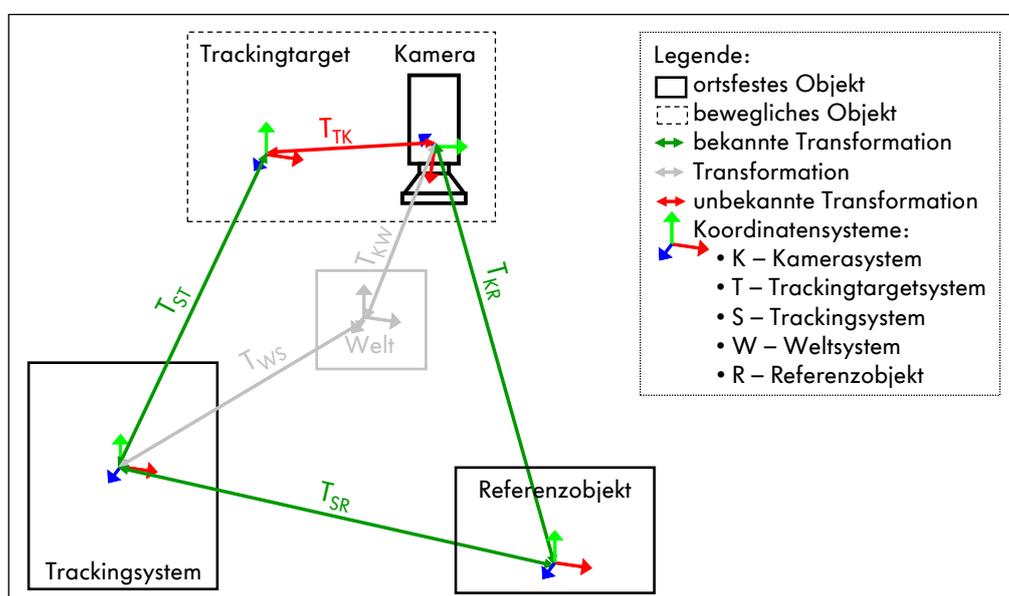


Abbildung 4-17: Prinzipskizze zur Target-Kamera-Kalibrierung (rote Transformation), [eigener Entwurf]

Da sich die unbekannte Transformation zwischen Trackingtarget und Kamera ( $T_{TK}$ ) nicht direkt messen lässt, kann sie nur indirekt durch die Kombination bekannter Transformationen bestimmt werden. Zu diesem Zweck wird ein Referenzobjekt (R) erzeugt, welches sich sowohl zur Kamera ( $T_{KR}$ ) als auch zum Trackingtarget in Beziehung setzen lässt. Die Beziehung zwischen Trackingtarget und Referenzobjekt ist ein Vektorprodukt aus der Transformation von Trackingsystem zum -Target ( $T_{ST}$ ), also dem Trackingwert, und der Registrierungstransformation des Trackingsystems zum Referenzobjekt ( $T_{SR}$ ).  $T_{TK}$  ergibt sich damit wie folgt:

$$T_{TK} = T_{KR} \times (T_{SR} \times T_{ST}) \quad (4.1)$$

<sup>13</sup> Aus der Literatur auch als „Hand-Eye-Kalibrierung“ bekannt [Pen08].

Um Mess- bzw. Trackingfehler auszugleichen, empfiehlt es sich die Target-Kamera-Transformation wiederholt mit verschiedenen Kamerapositionen zu bestimmen und den Ausgleichswert zu bilden. Bei mehreren Datensätzen mit variierender Kamerapose berechnet sich  $T_{TK}$  als:

$$T_{TK} = \sum_{k=1}^n \frac{T_{KR_k} \times (T_{SR} \times T_{ST_k})}{n}, \quad n = \text{Anzahl von Datensätzen} \quad (4.2)$$

Das Aufzeichnen von  $T_{KR}$  und  $T_{ST}$  zum Erzeugen eines zusammengehörigen Datensatzes erfolgt synchron. Alternativ kann eine asynchrone Aufnahme erfolgen, wenn sichergestellt ist, dass sich die relativen Positionen der beteiligten Systeme während der Aufnahme zueinander nicht ändern.

#### 4.3.4 Registrierung

Um einen Soll/Ist-Vergleich mit Augmented Reality durchzuführen, ist eine kongruente Überlagerung der virtuellen Objekte notwendig (vgl. Kapitel 2.1.2.3). Gerade die kongruente Überlagerung erfordert eine möglichst präzise Registrierung des AR-Systems im Weltkoordinatensystem.

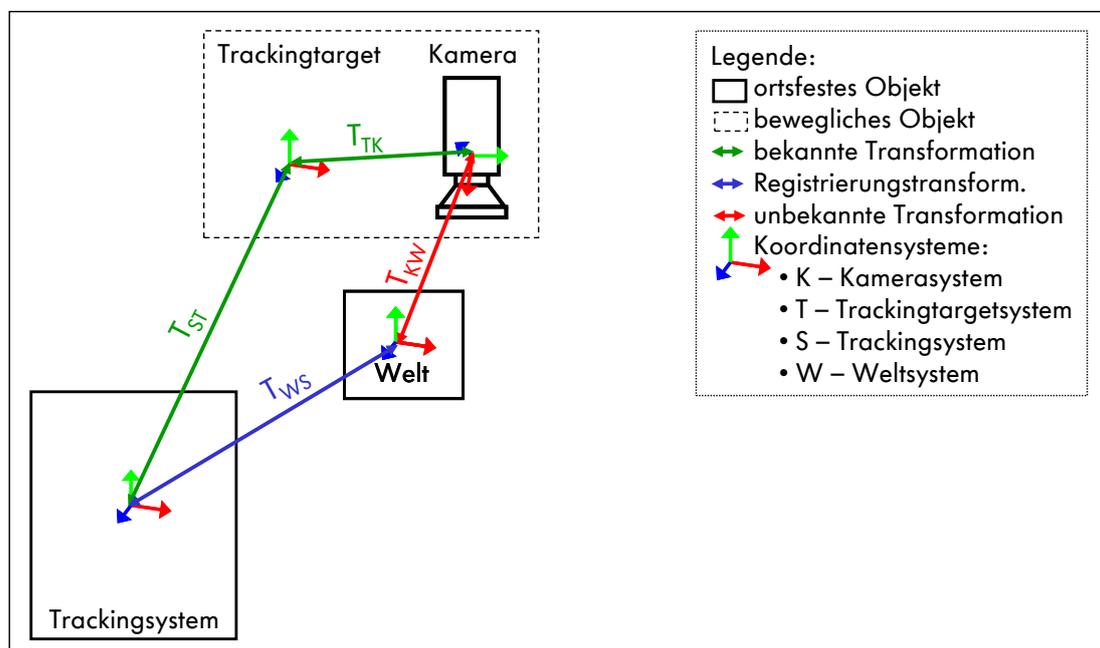


Abbildung 4-18: Registrierung des AR-Systems im Weltkoordinatensystem [eigener Entwurf]

Abbildung 4-18 illustriert die Kamerapose im Bezug zur Welt. Die im Bild rot dargestellte Transformation zwischen Kamera- und Weltkoordinatensystem ( $T_{KW}$ ) ist unbekannt und wird mit Hilfe eines geeigneten Trackingsystems ermittelt. Dafür ist die Kenntnis über die blau

dargestellte Transformation zwischen Trackingsystem und Weltkoordinatensystem ( $T_{WS}$ ) erforderlich. Diese Transformation wird durch den Prozess der Systemregistrierung ermittelt. Da für eine AR-Anwendung kein universelles Trackingsystem existiert [PBDM07], wird das Trackingsystem entsprechend den individuellen Randbedingungen des Anwendungsszenarios ausgewählt. Wenn dabei die Randbedingungen des Szenarios (z.B. verfügbare Referenzpunkte) beachtet werden, sollte das Trackingsysteme angemessene Funktionen beinhalten, um eine Registrierung in der Realität durchzuführen.

Das direkte Tracken des Kamerakoordinatensystems ist nur möglich, wenn als Trackingsystem die Kamera selbst eingesetzt wird (Spezialfall Markertracking, siehe Abbildung 4-19). Andernfalls wird ein Target eingesetzt, welches fest an der Kamera montiert wird. Entsprechend der eingesetzten Trackingtechnologie ist die Transformation zwischen Trackingsystem und Trackingtarget ( $T_{ST}$ ) direkt messbar. Die Transformation zwischen Trackingtarget und Kamera ( $T_{TK}$ ) ist durch deren feste Verbindung stabil und wird in einem gesondertem Kalibriervorgang separat ermittelt (s. Kapitel 4.3.3.2).

Wird die Kamera selbst als Trackingsystem für ein optisches Markertracking verwendet, ergibt sich der in Abbildung 4-19 dargestellte Spezialfall der in 4-18 gezeigten Konfiguration.

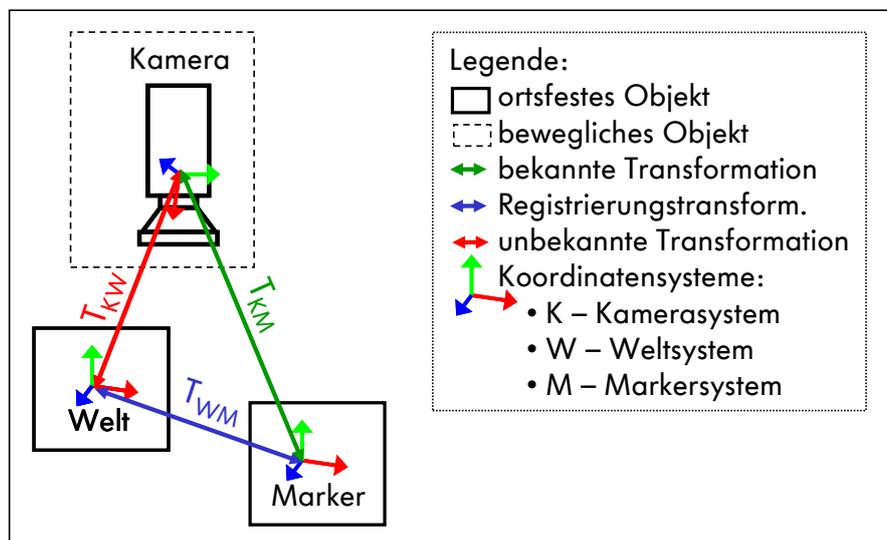


Abbildung 4-19: Spezialfall Markertracking [eigener Entwurf]

Da die Kamera mit dem Trackingsystem übereinstimmt, entspricht die Transformation zwischen beiden der Einheitsmatrix und beeinflusst die gesuchte Transformation bei der Berechnung des Vektorprodukts nicht. Die Transformation des optischen Trackingtargets (Marker) zur Kamera ( $T_{KM}$ ) wird direkt bestimmt, wodurch die Kalibrierung zwischen Trackingtarget und Kamera entfällt. Für die Registrierung bedeutet dies das Bestimmen der Transformation der verwendeten Marker zum Weltkoordinatensystem ( $T_{WM}$ ).

#### 4.3.5 Ist-Aufnahme

Die Aufnahme des Ist-Zustandes ist stark durch die geplante Auswertestrategie geprägt. Im Fall einer Online-Auswertung findet die Ist-Aufnahme parallel mit der Analyse der AR-Szene statt. Betriebsmittel werden aus allen gewünschten Perspektiven betrachtet und in Echtzeit mit ihren Modellen abgeglichen. Bei der Offline-Auswertung erfolgt das Erstellen von Aufnahmen (Fotos, Videos und Trackingdaten) für eine spätere Überlagerung ohne Kenntnis über das Vorhandensein virtueller Geometrie im betrachteten Bildausschnitt. Um unter diesen Bedingungen alle notwendigen Bildinformationen zu erfassen, ist ein strukturiertes Vorgehen notwendig. Die im Folgenden aufgeführten Grundsätze wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und sind sowohl bei der Online- als auch bei der Offline-Auswertung zu beachten.

Aufgrund der Größe von Karosseriebaubetriebsmitteln wird bei der Ist-Aufnahme ein erhebliches Volumen an Erfassungsdaten generiert, das im Nachgang nicht immer schnell und eindeutig einzelnen Betriebsmittelelementen zugeordnet werden kann. Der zu untersuchende Umfang sollte daher vor oder spätestens während der Ist-Aufnahme in sinnvolle Cluster gegliedert werden. Bei der Erfassung wird für jeden Cluster ein separater Datensatz erstellt, so dass auch nach der Untersuchung eine schnelle Zuordnung zu den Betriebsmitteln möglich ist. Für die optische Erfassung groß dimensionierter Betriebsmittel empfiehlt sich die Verwendung einer weitwinkligen Kameraoptik mit einer Brennweite von sechs bis maximal 18 Millimetern. Größere Brennweiten führen zu kleinen Bildausschnitten mit wenig Überblick, so dass einzelne Betriebsmittelkomponenten nur schwer mit anderen in Bezug gesetzt werden können. In diesem Zusammenhang ist darauf zu achten, dass sämtliche, bei der Kalibrierung des optischen Systems relevanten, Kameraparameter mit den Einstellungen zum Zeitpunkt der Kalibrierung übereinstimmen und über den gesamten Erfassungszeitraum hinweg konstant bleiben (vgl. 4.3.3.1). Abweichende Parameter wie Brennweite (Zoomstufen), Auflösung oder Hauptpunktlage verändern die Bildverzeichnung so, dass keine exakte kongruente Überlagerung mehr möglich ist. Auf Basis dieser Informationen ist abzuleiten, dass der optische Arbeitsabstand während der Ist-Aufnahme notwendigerweise der Aufnahmeentfernung zum Zeitpunkt der Kamerakalibrierung entspricht. Andernfalls entstehen unscharfe Aufnahmen. Ferner ist darauf zu achten, dass die Registrierungsparameter des AR-Systems während der IST-Aufnahme nicht verändert werden. Im Fall eines Inside-Out-Trackinggerätes bedeutet dies, die Relativposition des Trackinggerätes zum registrierten Weltkoordinatensystem nicht mehr zu verändern. Beim Outside-In-Tracking ist es andererseits notwendig, die stabile Position registrierter Trackingobjekte (z.B. Marker) vom Zeitpunkt der Registrierung bis zum Ende der Ist-Aufnahmen sicherzustellen.

### 4.3.6 Analyse

Vor der Analyse einer AR-Szene wird dieselbe mit Hilfe der Informationen der vorbereitenden Prozessschritte generiert. Dazu wird das gewählte AR-System mit den erfassten Bilddaten, aufbereiteten 3D-Modellen, sowie Kalibrier- und Trackinginformationen gespeist. Bei einer Online-Auswertung fließen die Erfassungsdaten live in die AR-Szene ein, während die Daten bei einer Offline-Auswertung aus gespeicherten Dateien abgerufen werden. Je nach Implementierungsumfang des eingesetzten AR-Systems existieren zahlreiche Funktionen, die zur Analyse der AR-Szene genutzt werden können. Diese lassen sich grob in die drei Kategorien Visualisierung, Transformation und Vermessung einteilen.

#### 4.3.6.1 Visualisierungsfunktionen

Visualisierungsfunktionen unterstützen die Auswertung durch verschiedene Darstellungen der virtuellen Geometrie. Dazu gehören Volumenkörperdarstellung, Verdeckungen, Drahtgitterdarstellung, Unsichtbarkeit, Transparenzen, Teilkörper- und Schnittdarstellungen, sowie Posenänderungen. Abbildung 4-20 stellt virtuelle Modelle beispielhaft als Volumenkörper, Verdeckungsgeometrie sowie Drahtgittermodell dar.

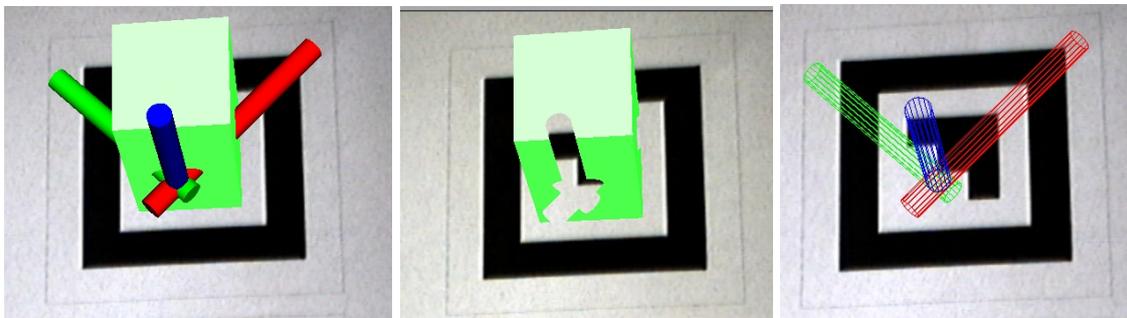


Abbildung 4-20: Visualisierungsalternativen virtueller Geometrie in AR-Szene: Volumenkörper (links), Verdeckungsgeometrie (Mitte), Drahtgitter (rechts); [Pen08]

Die Volumendarstellungen sind als Standardvisualisierung virtueller Objekte bekannt und zeigen diese als solide 3D-Modelle. Verdeckende Geometrie wird nicht angezeigt, hat jedoch einen wesentlichen Einfluss auf die virtuelle Umgebung. Reale Objekte können in einer Szene beispielsweise durch eine virtuelle Verdeckungsgeometrie repräsentiert werden, so dass andere virtuelle Objekte, die sich räumlich dahinter befinden, verdeckt werden. In der Drahtgitterdarstellung werden lediglich die Kanten der virtuellen Geometrie angezeigt. Diese Darstellungsform hat sich in der Vergangenheit bereits für den visuellen Vergleich realer und virtueller Objekte bewährt [NK06]. Das Unsichtbarmachen bzw. Ausblenden virtueller Objekte gibt den Blick auf die vorher überlagerte reale Szene frei. Dies ist ebenfalls mit einer

transparenten Geometriedarstellung möglich, wobei jedoch der Bezug zum virtuellen Objekt bestehen bleibt. Spielarten des Ausblendens von Geometrie sind das Anzeigen von Teilmodellen eines zusammengesetzten Objektes sowie das Schneiden (engl. Clipping) von Objektgeometrie mit einer virtuellen Schnittebene. Dabei wird nur ein Teil des geschnittenen Objekts visualisiert. Als letzte Visualisierungsfunktion ist die Änderung der Kamerapose zu nennen. Durch einen anderen Betrachtungsstandpunkt oder eine andere Blickrichtung lassen sich Erkenntnisse ableiten, die mit der Analyse einer einzelnen Perspektive nicht möglich sind. Je nach Auswertestrategie erfolgt die Posenänderung live durch Bewegen der Kamera (Online-Auswertung) oder durch das Einladen neuer Bild- und Trackingdaten (Offline-Auswertung) in die AR-Szene.

#### **4.3.6.2 Transformationsfunktionen**

Unter dem Begriff der Transformationsfunktionen werden Funktionen zusammengefasst, die eine Veränderung von geometrischen Eigenschaften der untersuchten virtuellen Objekte bewirken. Gängige Transformationen sind Translation, Rotation und Skalierung. Unter Translation wird die Verschiebung von Objektgeometrie entlang einer Koordinatenachse verstanden, während bei der Rotation die Drehung um eine beliebige Koordinatenachse ermöglicht wird. Dadurch lassen sich Abstand eines versetzt aufgebauten bzw. Abweichungswinkel eines verdreht montierten Betriebsmittels schnell bestimmen.

#### **4.3.6.3 Vermessungsfunktionen**

Vermessungsfunktionen haben weder Einfluss auf die Darstellung noch die Geometrie virtueller Objekte. Sie eignen sich weniger zum Erkennen von Abweichungen und werden vielmehr zur Quantifizierung bekannter Abweichungen eingesetzt. Bekannte Vermessungsfunktionen sind Abstandsmessungen, Kollisionsberechnungen sowie bildbasierte oder taktile Geometrierekonstruktion. Abstandsmessungen und Kollisionsberechnungen sind in aller Regel nur zwischen virtuellen Objekten möglich. Abstände können dabei zwischen allen denkbaren geometrischen Objekten wie Punkten, Kanten und Ebenen gemessen werden. Das Ergebnis ist der kürzeste euklidische Abstand zwischen den vermessenen Objekten bzw. der Abstand der einzelnen Vektorkomponenten.

Zur Berechnung von Kollisionen existieren mehrere Lösungen auf Basis unterschiedlicher Algorithmen. Einige Implementierungen liefern als Ergebnis eine logische Aussage über das Vorhandensein einer Kollision zwischen zwei Objekten, während andere die Kollisionskoordinaten oder gar einer Schnittkörper der sich durchdringenden Geometrien berechnen. Kollisionsprüfungen sind heute aufgrund der komplexen Objektgeometrie von Karosserie-

baubetriebsmitteln nicht in Echtzeit möglich. So werden diese Prüfungen oft nur bei Offline-Auswertungen und teilweise nur mit Umrandungsgeometrien (Bounding Box) durchgeführt, da dies performanter ist als die Berechnung mit ausdetaillierten Objektmodellen.

Eine besondere Form von Vermessungsfunktionen ist die Geometrierekonstruktion. Sie grenzt sich deutlich von Abstandsmessungen oder Kollisionsberechnungen ab, da hierbei die Vermessung realer Objekte stattfindet. Es wird zwischen bildbasierten und taktilen Rekonstruktionsmethoden unterschieden. Taktile Methoden kommen lediglich bei einer Onlineauswertung zum Einsatz, da hierbei das Trackingsystem zum direkten Vermessen realer Objekte genutzt wird [PBR+08]. Bildbasierte Rekonstruktionsverfahren nutzen entweder aus Stereobildern gewonnene Tiefeninformation [KB09] oder Bildfeature, die in mindestens zwei orientierten Bildern<sup>14</sup> erkannt werden [God02]. Featureerkennung und -zuordnung können sowohl automatisch als auch manuell erfolgen. Unabhängig vom verwendeten Verfahren erfolgt nach der Rekonstruktion von Punkten die Vernetzung derselben zu Kanten und Flächen, wodurch die Rekonstruktion komplexer Geometrien möglich ist. Diese können im Anschluss direkt durch Abstandsvermessung oder Kollisionsberechnungen mit anderen virtuellen Objekten verglichen werden.

### **4.3.6.4 Zusammenfassung**

Für das automatische Auswerten von AR-Szenen existieren bisher keine geeigneten Verfahren. Bekannte Verfahren aus der industriellen Bildverarbeitung, beispielsweise der Qualitätssicherung [GK06], sind für statische Szenen konzipiert und daher nicht auf den flexiblen Anwendungsfall des Soll/Ist-Vergleichs von Betriebsmitteln übertragbar. Der gesamte Auswerteprozess erfolgt demnach manuell, so dass die Analyseergebnisse stark von der persönlichen Erfahrung des Auswertenden abhängig sind. Bisher ist nicht bekannt, welche Funktion das größte Potenzial zum Erkennen von Abweichungen bietet. So wurde in der Vergangenheit die Visualisierung als Drahtgittermodell intuitiv als „beste“ Analysefunktion für Soll/Ist-Vergleiche gewählt (vgl. [NK06]). Bisläng ist dies jedoch weder durch eine Untersuchung belegt, noch ist bekannt ob eine Analysefunktion zum Erkennen aller möglichen Abweichungsvarianten (vgl. 4.2.2) gleichermaßen gut geeignet ist.

---

<sup>14</sup> Als orientierte Bilder werden Aufnahmen bezeichnet, deren Trackingdaten bzw. Kamerapose bekannt ist.

#### **4.3.7 Dokumentation**

Der Prozessschritt der Dokumentation ist von großer Relevanz für die spätere Verwertung der Analyseergebnisse. Derzeit existiert kein Standard zur Dokumentation der Ergebnisse AR-basierter Soll/Ist-Vergleiche. Da die Vergleichsdurchführung in der Regel als Dienstleistung für eine beauftragende Planungsabteilung erfolgt, werden Plananpassungen auf Basis der Vergleichsergebnisse durch den Auftraggeber durchgeführt. Deshalb sollte die Dokumentation so aufbereitet sein, dass auch Unbeteiligte die erkannten Abweichungen eindeutig nachvollziehen können. Im Allgemeinen werden sie mit gängigen Office-Anwendungen dokumentiert und beinhalten Ansichten (Screenshots) der AR-Szene mit und ohne Überlagerungen virtueller Geometrie in verschiedenen Visualisierungsvarianten (sichtbar, unsichtbar, Transparenz, Drahtgitter und Schnitte) sowie berechnete Messwerte für Kollisionen, Abstände und andere Fehler. Weiterhin können neu erstellte 3D-Modelle in die Dokumentation einfließen, sofern Geometrierekonstruktionen durchgeführt wurden. Gegebenenfalls werden alle relevanten Daten der erstellten AR-Szene in der genutzten Analysesoftware in Form eines Projekts abgelegt, so dass sie zu einem späteren Zeitpunkt erneut bewertet werden können.

### **4.4 Zusammenfassung und Lösungsstrategie**

Im aktuellen Kapitel wurden die zu untersuchenden Betriebsmittel bezüglich möglicher Abweichungen und Einmessstrategien analysiert. Die Untersuchung potenzieller Abweichungsursachen zeigt, dass mittelfristig nicht mit einer Verbesserung der Situation zu rechnen ist. Daher werden Soll/Ist-Vergleiche auch in absehbarer Zeit noch eine relevante Rolle in der Produktionsplanung spielen. An die Ursachenanalyse schließt sich eine allgemeine Prozessbeschreibung für AR-basierte Soll/Ist-Vergleiche von Betriebsmitteln im Karosseriebau an, in der die einzelnen Teilprozesse auf Basis bekannter Arbeiten und vorhandener AR-Systeme im Detail beschrieben werden.

#### **4.4.1 Handlungsbedarf in den Teilprozessen**

Für die Teilprozesse Registrierung, der damit verbundenen Systemkalibrierung, dem Aufnahmeprozess sowie der Auswertung von AR-Szenarien wird im Rahmen dieser Arbeit hoher Handlungsbedarf identifiziert (vgl. Abbildung 4-21).



Abbildung 4-21: Handlungsbedarf bei AR-basierten Soll/Ist-Vergleichen von Betriebsmitteln [eigener Entwurf]

Insbesondere die Betrachtung des Teilprozesses Registrierung ist nur sehr allgemein und theoretisch möglich, da der konkrete Prozess stark durch den Anwendungsfall und die verwendete Trackingtechnologie geprägt ist. Die Randbedingungen beim Vergleich von Karosseriebaubetriebsmitteln stellen die Registrierung vor die Herausforderung ein stark variierendes Arbeitsvolumen abzudecken und dabei einem hohen Genauigkeitsanspruch gerecht zu werden. Es gibt zahlreiche Ansätze zur Lösung dieser Herausforderung, welche in der Laborumgebung durchaus praktikabel sind. Jedoch ist der Rüstaufwand für eine zufriedenstellende Registrierung in der realen Fabrikhalle bislang ein wirtschaftliches K.O.-Kriterium für den Einsatz der AR-Technologie. Während optische Trackingsysteme den Einsatz teurer Messtechniken erfordern, verlangt die Nutzung alternativer Trackingverfahren zumeist fest installierte und kalibrierte Hardware. Da eine korrekte Registrierung die Grundvoraussetzung für eine präzise kongruente AR-Überlagerung und somit auch eine Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Durchführung von Soll/Ist-Vergleichen ist, steht die Verbesserung des Registrierungsprozesses im Fokus dieser Arbeit.

Weiterer Handlungsbedarf zeigt sich sowohl bei der Aufnahme von IST-Daten als auch der Analyse von AR-Szenen. Bislang existiert kein Standard, der das Vorgehen zur Datenaufnahme beschreibt, so dass die Anwender diesen Prozess „nach Bauchgefühl“ durchlaufen. Demzufolge gibt es keine Erkenntnisse darüber ob und wie der Aufnahmeprozess das Vergleichsergebnis beeinflusst. Es stellen sich beispielsweise die Fragen wie viele und welche Fotos von Betriebsmitteln erstellt werden sollten, um ein optimales Ergebnis zu erzielen? Zur Verbesserung dieses Teilprozesses ist zunächst eine Untersuchung dieser Fragestellungen notwendig. Ebenso unstrukturiert erfolgt die Analyse bzw. Auswertung des AR-Szenarios durch die Anwender. Existierende AR-Systeme bieten zahlreiche Analysefunktionen an (vgl. Kapitel 4.3.6). Jedoch ist unklar welche Funktionen sich am besten oder aber nur schlecht zum Erkennen von Abweichungen eignen. Die Überfrachtung mit zu vielen, zum Teil auch ungeeigneten Funktionen, verkompliziert den ohnehin schon zeitaufwendigen manuellen Auswerteprozess. Darüber hinaus mangelt es an Analysefunktionen, die diesen manuellen Prozess zumindest durch eine teilautomatisierte Auswertung optimieren.

Die Teilprozesse der organisatorischen Vorbereitung, Datenbeschaffung und Ergebnisdokumentation sind für eine erfolgreiche Durchführung von Soll/Ist-Vergleichen hinreichend gut durchführbar. Solange hierfür jedoch keine definierten Standards existieren, die dem Nutzer ein strukturiertes Abarbeiten dieser Teilaufgaben ermöglichen, besteht natürlich auch auf diesen Gebieten ein gewisser Handlungsbedarf. Dieser ist aber nicht Inhalt dieser Arbeit.

#### 4.4.2 Lösungsweg

Erst wenn die aktuellen Herausforderungen im Bereich der Registrierung gelöst sind, ist eine Verbesserung der weiteren Teilprozesse sinnvoll. Daher ist es das vorrangige Ziel der Arbeit, den Registrierungsprozess zum Soll/Ist-Vergleich von Karosseriebaubetriebsmitteln im Automobilbau zu verbessern. Hierzu werden grundlegende Methoden zur Registrierung analysiert und die mögliche Implementierung mit existierenden Trackingsystemen bewertet. Auf Basis dieser Untersuchungen soll ein AR-Systemsetup entwickelt und implementiert werden, das eine Registrierung im Anwendungsumfeld von Karosseriebaubetriebsmitteln ermöglicht. Im Anschluss wird das realisierte System im realen Anwendungsumfeld evaluiert. Abbildung 4-22 verdeutlicht das geplante Vorgehen im oberen Bildausschnitt.

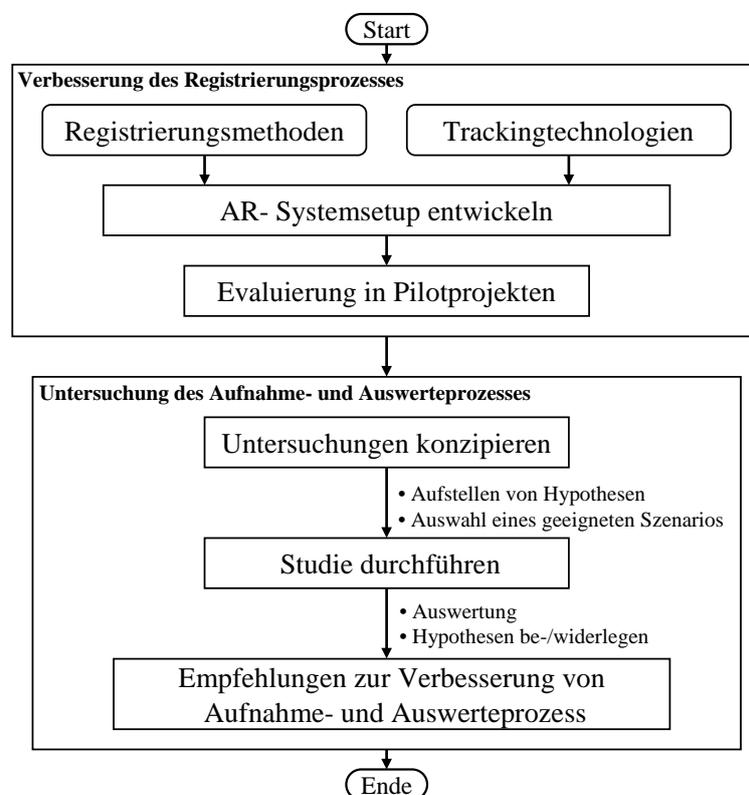


Abbildung 4-22: geplantes Vorgehen zur Verbesserung der Registrierung und Untersuchung von Aufnahme- und Auswerteprozess [eigener Entwurf]

Zur Verbesserung der Teilprozesse Istdatenerfassung und Auswertung ist die Beantwortung einiger grundlegender Fragestellungen notwendig. So ist bislang unklar, wie sich der Erfassungsprozess oder die verwendeten Auswertefunktionen auf das Ergebnis von Soll-/Ist-Vergleichen auswirken. Das Konzept zur Untersuchung dieser Fragestellungen wird im unteren Teil der Abbildung 4-22 dargestellt. Hierzu wird zunächst ein Konzept zur Untersuchung der beiden genannten Prozessschritte erarbeitet, mit dem sich konkrete Hypothesen in einem definierten Untersuchungsszenario prüfen lassen. Im Anschluss wird das erarbeitete Szenario in Form einer Studie realisiert. Aus den Erkenntnissen der Untersuchungen werden konkrete Vorschläge zur Verbesserung des Erfassungs- und Auswerteprozesses abgeleitet.

## 5 Verbesserung des Registrierungsprozesses

Die Registrierung ist ein entscheidender Prozess für die kongruente Überlagerung virtueller Planungsdaten mit der realen Welt. Ungenauigkeiten bei der Registrierung führen zu fehlerhaften Überlagerungen, wodurch Abweichungen schlecht zu erkennen sind.

Abbildung 5-1 zeigt die Koordinatensysteme, welche - unabhängig vom verwendeten Trackingsystem - innerhalb eines typischen industriellen AR- Szenarios auftreten. Diese Koordinatensysteme sind:

- Das Tracking-Koordinatensystem, das dem Ursprung des verwendeten Trackingsystems entspricht.
- Das Kamerakoordinatensystem, welches sich in der Regel im Mittelpunkt des optischen Sensors der verwendeten Kamera befindet (vgl. Kapitel 4.3.3.1).
- Das Koordinatensystem des Trackingtargets.
- Das Modell- bzw. Weltkoordinatensystem, in dem das virtuelle Modell konstruiert ist und das dem realen Objekt bei der Installation als Messreferenz zugrunde liegt.

Im Beispiel der Automobilindustrie entspricht das Modellkoordinatensystem eines Betriebsmittels wie z. B. einem Roboter in der Regel dem Fahrzeugkoordinatensystem (vgl. Kap. 4.1.2). Bei Volkswagen befindet sich der Fahrzeugursprung beispielsweise in der Mitte der Vorderachse und ist rechtshändig orientiert, so dass die X-Achse zum Fahrzeugheck und die Z-Achse zum Fahrzeugdach zeigen. Ein direktes Tracken dieses Koordinatensystems ist durch die Positionierung eines Trackingtargets im genannten Koordinatenursprung zumeist nicht möglich, da sich dieser im Inneren der Karosserie befindet und verdeckt ist. Für die korrekte Überlagerung der virtuellen Informationen über die realen Objekte, ist es daher notwendig, die in Abbildung 5-1 rot dargestellten Transformationen ( $T_{SW}$  bzw.  $T_{TW}$ ) zu bestimmen. Diese definieren die Transformation zwischen dem Koordinatensystem des Trackingsystems und dem Modellkoordinatensystem (Abbildung 5-1, oben), oder die Transformation zwischen Trackingtarget und Modellkoordinatensystem (Abbildung 5-1, unten).

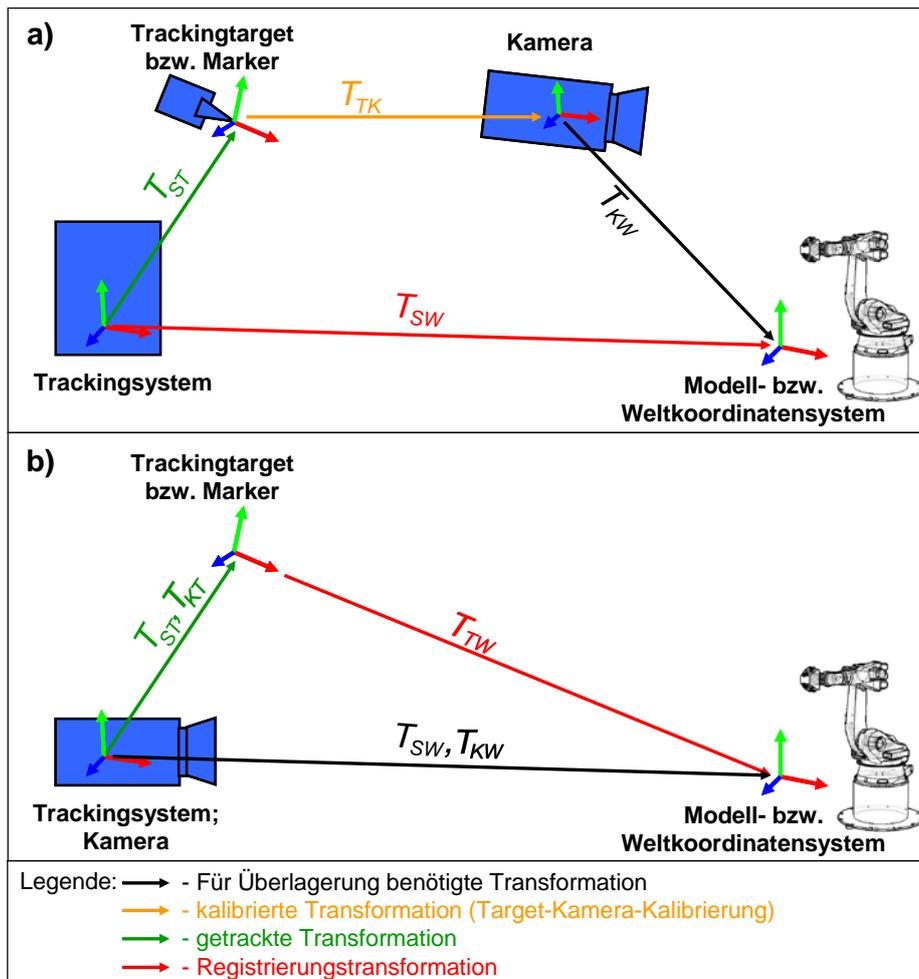


Abbildung 5-1: Koordinatensysteme in industriellen AR-Szenarien, rot: Registrierung [eigener Entwurf]

Registrierung im Umfeld industrieller AR-Anwendungen bedeutet, entweder die Position des Trackingsystems oder der Trackingtargets im Modell- bzw. Weltkoordinatensystem abzubilden. Der obere Teil von Abbildung 5-1 visualisiert die erste Variante, in der ein Trackingsystem fix im Szenario positioniert ist und die Pose einer beweglichen Kamera mit Hilfe eines Trackingtargets ermittelt wird. Der Fall von fest im Weltkoordinatensystem montierten Markern bzw. Trackingtargets ist im unteren Teil der Abbildung dargestellt. Beim optischen Markertracking wird die Kamera als Trackingsystem eingesetzt, so dass Trackingkoordinatensystem und Kamerakoordinatensystem identisch sind.

Im Grundlagenkapitel 2.4.5 werden bekannten Problemstellungen und Methoden zur Registrierung erläutert. Darauf aufbauend werden im Folgenden mögliche Trackingverfahren für AR-basierte Soll/Ist-Vergleiche von Betriebsmitteln bewertet und die Systemimplementierungen der ausgewählten Technologien vorgestellt.

## 5.1 Auswahl des Trackingsystems

Wie Abbildung 5-1 verdeutlicht, dient die Registrierung zum Bestimmen der Transformation zwischen Trackingsystem und Weltkoordinatensystem. Es gibt Trackingsysteme mit Messfunktionen, die ein direktes Messen der gesuchten Transformation ermöglichen. Andere Trackingsysteme halten keine speziellen Messfunktionen vor, so dass die Registrierung manuell oder mit zusätzlicher Messtechnik durchgeführt wird. Sind die Randbedingungen des Anwendungsszenarios bekannt, können verfügbare Trackingsysteme nach technischen und betriebswirtschaftlichen Kriterien wie Genauigkeit, Kosten, Reichweite, Ausfallsicherheit/Verfügbarkeit, Geometrierekonstruktion, Rüstaufwand und Registrierungsaufwand bewertet werden. Die Bewertungskriterien des vorliegenden Anwendungsfalls werden im Folgenden eingehend beleuchtet.

### 5.1.1 Bewertungskriterien

Die angestrebte **Trackingreichweite** variiert beim Soll/Ist-Vergleich von Karosseriebaubetriebsmitteln stark. Bei der Vollständigkeitsprüfung von Kontur- und Spannelementen einer einzelnen Vorrichtung beträgt die Arbeitsentfernungen etwa ein bis drei Meter, während bei der Positionsüberprüfungen von Robotern oder Vorrichtungen innerhalb einer Line schnell Arbeitsentfernungen von über 50 Metern erreicht werden. Die Genauigkeitsanforderungen variieren entsprechend. So werden bei einem Vorrichtungsabgleich Genauigkeiten im Bereich von fünf Millimetern in einem Arbeitsvolumen von ca. drei mal fünf Metern angestrebt. Die Genauigkeitsanforderung bei der Überprüfung von Vorrichtungspositionen innerhalb einer Line beträgt hingegen einige Zentimeter und ist konkret von der Liniengröße abhängig. So werden bei einer Anlagelänge von 50 Meter Abweichungen von bis zu zehn Zentimetern toleriert.

Die Umgebungsbedingungen der Fertigungsumgebung beeinflussen direkt den stör- bzw. **ausfallsicheren Betrieb** einiger Trackingsysteme. Der massive Stahlbau erzeugt beispielsweise Unregelmäßigkeiten im Erdmagnetfeld, die den Einsatz von Inertialsensoren oder die Signalübertragung von Indoor-GPS-Empfängern behindern. Weiterhin werden spiegelnde oder reflektierende Materialien eingesetzt, die zu Störsignalen bei einigen optischen Trackingtechnologien führen. Ein Beispiel hierfür ist die Verkleidung von Leitungen oder Klebeeinrichtungen mit Aluminiumfolie, die bei Infrarottrackingsystemen zu starkem Rauschen führt.

Als weitere Anforderung an die eingesetzte Trackingtechnologie wurde in Kapitel 4.3.6.3 die **Rekonstruktion realer Geometrie** identifiziert. So können erkannte Abweichungen quantifiziert und im Planungsmodell fehlende Geometrie ergänzt werden. Einige Trackingsysteme nutzen reale Objektfeature und eignen sich entsprechend gut zur Rekonstruktion von Umgebungsgeometrie. Werden Objektfeature nicht direkt zum Tracken genutzt, ist auch eine softwaregestützte Extraktion aus orientierten Bildern möglich. Dabei beeinflussen die Genauigkeit des eingesetzten Trackingsystems und der Kamera direkt die Qualität der rekonstruierten Objektpunkte. Werden Koordinatenmessgeräte, wie der in Kapitel 2.1.2.1 genannte Messarm, als Trackingsystem eingesetzt, ist auch ein taktiles Vermessen realer Objekte möglich.

Ein entscheidendes Kriterium für den vorliegenden Anwendungsfall ist der notwendige **Rüstaufwand** des Trackingsystems. Bei Outside-In-Systemen wächst der Rüstaufwand für Erfassungssysteme - abhängig von deren Reichweite - mit der Größe des zu trackenden Arbeitsraums. So sind für die Erfassung einer Fläche von 25 m<sup>2</sup> mit einem Infrarottrackingssystem ca. acht fest installierte Infrarotkameras notwendig [HBB+11]. Bei einer Vergrößerung der Fläche steigt die Anzahl der benötigten Kameras, die für eine Untersuchung fest verbaut und kalibriert werden müssen. Der Rüstaufwand ist erheblich und übersteigt mit seinen Kosten schnell den wirtschaftlichen Wert des Soll/Ist-Vergleichs. Die Inside-Out-Lösung des optischen Markertrackings arbeitet unabhängig von der Szenariogröße mit nur einer Kamera als Erfassungssystem, benötigt aber bei wachsendem Arbeitsvolumen zusätzliche Trackingmarker. Obgleich die Kosten für Marker nur gering sind, ist die Rüstzeit der Produktionsumgebung kritisch, wenn für eine Untersuchung nur kurze Zeitfenster zur Verfügung stehen.

Das Ausrüsten mit Trackingtargets oder Erfassungssystemen steht fast immer in direktem Zusammenhang mit der **Registrierung** in der Fertigungsumgebung. Im ersten Fall werden dazu Trackingtargets an den bekannten Referenzpunkten an Hallensäulen oder Betriebsmitteln (vgl. Kapitel 4.1.3 „Bezugssysteme und Referenzpunkte“) montiert. Bei der zweiten Variante wird das Erfassungssystem fest positioniert und anschließend zu den bekannten Referenzpunkten vermessen. Bei den Referenzpunkten handelt es sich entweder um genormte Bohrungen in Betriebsmittelgrundplatten, Bolzen an Hallensäulen oder die genau vermessenen Seitenflächen von Hallensäulen, sowie dem Hallenboden als z-Nullenebene. Das verwendete Trackingsystem muss Variante eins oder zwei mit der geforderten Genauigkeit unterstützen. In beiden Fällen handelt es sich um eine Registrierung von 3D- zu 3D-Korrespondenzen, so wie sie im Kapitel 2.4.5 vorgestellt wurde.

### 5.1.2 Bewertung

In Kapitel 2.1.2.1 wurden grundlegende Trackingtechnologien entsprechend ihrer physikalischen Wirkprinzipien vorgestellt. Tabelle 5-1 bewertet die Eignung aktuell verfügbarer Trackingsysteme nach den oben genannten Kriterien.

Tabelle 5-1: Eignung von Trackingsystemen für Soll/Ist-Vergleiche von Karosseriebaubetriebsmitteln, Bewertung von -2 (sehr schlecht) über 0 (neutral) bis 2 (sehr gut), eigener Entwurf nach [Dos08]

	Marker	Infrarot	KMG*	Markerlos	GPS	Innertial	Ultraschall
Genauigkeit	1	1	2	-1	-1	-2	1
Kosten	2	-1	-2	2	-1	0	-1
Rüstaufwand	0	-1	1	2	-1	1	-1
Reichweite / Robustheit	1	0	0   2	-1	0	0	-1
Geometrierekonstruktion	-1	-1	2	2	-1	-1	-1
<i>Registrierungsprozess</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>-1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<b>Summe:</b>	<b>4</b>	<b>-1</b>	<b>5   7</b>	<b>3</b>	<b>-4</b>	<b>-2</b>	<b>-3</b>

\* Koordinatenmessgeräte

Die aufgeführten Systeme wurden für jedes Bewertungskriterium auf einer Skala von -2 (sehr schlecht) bis 2 (sehr gut) bewertet. Eine Gesamtnote zur Eignung der bewerteten Systeme ergibt sich durch Addition der einzelnen Punktwerte. Neben der Gesamtnote hat die Registrierungsunterstützung als wichtigstes Entscheidungskriterium besonders starkes Gewicht bei der Festlegung eines Trackingsystems.

Im Ergebnis stellen sich Infrarot-, GPS-, Innertial- sowie Ultraschallsysteme für den beschriebenen Anwendungsfall als wenig geeignet heraus. Die Systeme zeigen Schwächen in den Bereichen Genauigkeit, Rüstaufwand sowie Reichweite und Robustheit. Mit Ausnahme des Infrarottrackings wird auch der Registrierungsprozess nicht ausreichend unterstützt.

Entsprechend der Gesamtnote sind markerloses Tracking sowie optisches Markertracking oder Koordinatenmessgeräte die Systeme der Wahl.

#### 5.1.2.1 Markerloses Tracking

Der Einsatz markerlosen Trackings (2.1.2.1) ist kostengünstig, da keine besondere Trackinghardware und somit wenig Rüstaufwand notwendig ist. Darüber hinaus eignen sich die Trackingdaten, welche in Form einer Punktwolke der getrackten Featureelemente vorliegen, hervorragend zur Geometrierekonstruktion. Die fehlenden realen Trackingtargets stellen

jedoch ein Problem für den Registrierungsprozess dar, da Betriebsmittelreferenzelemente nicht eindeutig und zumeist auch nicht als direktes Feature getrackt werden können. Zudem ist die Trackingreichweite bislang nicht hinreichend zuverlässig. Das in [CKM08] vorgestellte SLAM-Verfahren 2.1.2.1) verwendet mehrere Featurekarten, um den Einsatz in größeren Umgebungen zu ermöglichen. Der Ansatz erscheint viel versprechend für die Zukunft, erreicht allerdings nicht die in der Fabrikplanung geforderte Genauigkeit [CGKM07]. Weiterhin ist die notwendige Menge von Featurekarten zur Abbildung einer kompletten Produktionsanlage sehr groß. Neben hohen Einlernzeiten sind Millionen von Features effizient zu verwalten und zu durchsuchen, wofür überdies noch eine statische Umgebung vorausgesetzt wird. Ein weiteres Problem sind symmetrische Strukturen in industriellen Produktionsanlagen und Fabrikhallen, die zu Ambivalenzen bei der Positionsbestimmung führen können.

Mit diesen Nachteilen - insbesondere im Bereich der Registrierung - erfüllen markerlose Trackingsysteme wichtige Hauptkriterien des Soll/Ist-Vergleichs von Betriebsmitteln nicht und scheiden somit trotz der guten Gesamtbewertung von 3 Punkten aus.

### **5.1.2.2 Markertracking**

Markertracking zeichnet sich durch die geringen Kosten der Trackingtargets aus. Gleichzeitig werden zufriedenstellende Genauigkeiten erreicht, sofern eine Kamera mit hoher Auflösung bzw. ausreichend große Marker verwendet werden. Das Tracking ist im Arbeitsraum einer Betriebsmittelvorrichtung robust und mit wenig Rüstaufwand durchführbar. Darüber hinaus ermöglichen die Trackingmarker ein näherungsweise Antasten von Referenzpunkten oder Flächen, was den Registrierungsprozess wesentlich unterstützt [PBR+08].

In großen Arbeitsräumen, beispielsweise beim Positionsabgleich von Vorrichtungen innerhalb einer Fertigungslinie, steigt der Rüstaufwand eines markerbasierten Trackings. In diesem Fall kann eine ausreichend genaue Überlagerung nur durch unverhältnismäßig große Markermuster (vgl. Kapitel 5.2.1) oder durch eine hohe Targetanzahl gewährleistet werden. Das Bewertungskriterium der Trackingreichweite wird somit nicht für alle Anwendungsfälle zufriedenstellend erfüllt. Ein weiterer Nachteil ist die Notwendigkeit das Trackingtarget vollständig abzubilden. So wird ein Teil des zu untersuchenden realen Szenarios durch das Trackingtarget verdeckt, was sich nachteilig auf die Analyse des AR-Szenarios auswirkt.

Für eine Rekonstruktion von Umgebungsgeometrie sind markerbasierte Trackingverfahren kaum geeignet. So lassen sich lediglich jene Geometrielemente rückführen, die zur Montage eines definierten Markerkörpers genutzt werden.

### 5.1.2.3 Koordinatenmessgeräte

Koordinatenmessgeräte<sup>15</sup> erfüllen alle technischen Anforderungen für das gesuchte Trackingssystem. Trotz der hohen Investitionskosten erreichen sie in der Gesamtwertung mit fünf bzw. sieben die höchste Punktzahl.

Es gibt zwei Arten von portablen Koordinatenmessgeräten, die für Soll/Ist-Vergleiche im industriellen Umfeld geeignet sind: Mechanische Messarme und Lasertracker. Der wesentliche Unterschied beider Systeme liegt in der Trackingreichweite.

#### Mechanische Koordinatenmessgeräte

Mechanische Koordinatenmessgeräte oder so genannte Messarme setzen sich aus mehreren Grundkörpern definierter Länge zusammen, die über Gelenke miteinander verbunden sind. In den Gelenken werden Drehwinkel abgenommen, so dass in Echtzeit präzise Messwerte im Genauigkeitsbereich von wenigen hundertstel Millimetern erfasst werden können. Zum Rüstaufwand gehören neben Aufbau und Registrierung des Messarms auch eine Kalibrierung zwischen Messtaster und Kamera. Diese ist nach jeder Montage der Kamera an den Messarm durchzuführen. In der Produktionsumgebung existieren keine bekannten Störfaktoren, die das Trackingsystem beeinflussen. Somit ist das Tracking sehr robust. Die meisten am Markt verfügbaren Systeme erfassen alle sechs räumlichen Freiheitsgrade, wobei die Bewegungsfreiheit und das Trackingvolumen durch die Gelenke und Abmessungen der Verbindungselemente limitiert sind. Mit einer Reichweite von bis zu zwei Metern eignen sich Messarme zur Untersuchung von Betriebsmittelvorrichtungen mittlerer Größe. Die Registrierung ist durch das Antasten bekannten Betriebsmittelfeature schnell und präzise möglich [PBR+08]. In gleicher Weise können Koordinaten realer Messpunkte abgenommen werden. Das ermöglicht die manuelle Rekonstruktion von Umgebungsgeometrie während der Untersuchung.

#### Lasertracker

Lasertracker messen in Echtzeit die 3D-Koordinaten eines definierten Punktes und ermitteln so die Position eines Trackingtargets im Raum. Am Markt sind heute Targets verfügbar, die aktiv ihre Orientierung zum Trackingsystem messen [CHS+08]. Durch die Kombination von Lasertracker und entsprechendem Target entsteht ein 6-DOF Trackingsystem. Die Trackingreichweite mit einem aktiven Target beträgt bis zu 40 Meter, woraus sich eine Gesamtreichweite von 80 Meter um den Lasertracker herum ergibt. Damit lassen sich ganze

---

<sup>15</sup> Der Begriff Koordinatenmessgerät beschränkt sich hier auf mobile bzw. portable Messgeräte, wie sie in Kapitel 2.1.2.1 vorgestellt wurden. Stationäre Geräte wie Portalmeßmaschinen sind für den vorliegenden Anwendungsfall ungeeignet.

Fertigungslinien mit nur einem Einrüstvorgang untersuchen. Nach Inertialsystemen und GPS bieten Lasertracker die höchst mögliche Reichweite bei gleichzeitig wesentlich höherer Trackinggenauigkeit. Diese liegt beispielsweise bei 30 µm in einer Arbeitsentfernung von 20 Metern (Winkelauflösung von  $\pm 0,07$  Winkelsekunden)<sup>16</sup>. Die Systemgenauigkeit erfüllt damit deutlich die durch den Anwendungsfall geforderten Werte. Innerhalb des Trackingvolumens kann das Target frei bewegt werden, solange die direkte Sichtlinie zwischen Lasertracker und Trackingtarget bestehen bleibt (Line-Of-Sight-Restriktion). Bei Unterbrechung der Sichtverbindung wird das Target neu anvisiert; ein erneutes Einmessen ist nicht notwendig. Bei günstigen Sichtverhältnissen kann so eine komplette Fertigungslinie mit nur einer Lasertrackerregistrierung durchgeführt werden. Andernfalls ist der Lasertracker umzusetzen und neu einzumessen. Ein Lasertracker stellt hierfür als bewährtes Messsystem verschiedene Funktionen zur Verfügung. Neben der Einmessung durch das antasten definierter Geometriefeatures [PBR+08] ist beispielsweise die „Best-Fit“-Ausrichtung an einem 3D-Modell möglich. Ein Einmessvorgang in einer Fabrikhalle dauert ca. 15 bis 30 Minuten. Nach der Registrierung können die Koordinaten realer Messpunkte abgenommen und zur Geometriekonstruktion genutzt werden. Zum weiteren Rüstaufwand gehört wie bei Messarmen die einmalige Kalibrierung zwischen der Kamera und dem Trackingtarget.

### **Koordinatenmessgeräte - Fazit**

Die große Reichweite des Lasertrackers macht ihn für die Anwendung im Fabrikplanungsumfeld besonders interessant. Daher wird er gegenüber mechanischen Messarmen bei der Lösungsfindung priorisiert. Die Ergebnisse der zu entwickelnden Lösung sollten sich auf andere portable Koordinatenmessgeräte, wie zum Beispiel auf Messarme, übertragen lassen.

### **5.1.3 Auswahl**

Die Bewertung zeigt, dass sowohl das optische Markertracking als auch das Tracken mit Koordinatenmessgeräten zum Soll/Ist-Vergleich von Betriebsmitteln geeignet sind. Koordinatenmessgeräte sind dem optischen Markertracking in fast allen Bewertungskriterien überlegen, verursachen jedoch hohe Kosten. Ob sich die hohen Investitionen durch das erwartete Untersuchungsergebnis amortisieren ist fraglich. Daher ist es empfehlenswert vornehmlich mit markerbasierten Trackingsystemen zu arbeiten und Koordinatenmessgeräte

---

<sup>16</sup> Technische Daten als Beispiel aus dem Datenblatt des Smart Track Sensors (STS) der Fa. API in Verbindung mit dem Lastracker T3 der gleichen Firma

dann einzusetzen, wenn das Markertracking an seine technischen Grenzen stößt (Reichweite, Genauigkeit) und mit einem Ergebnis gerechnet werden kann, das diesen finanziellen Aufwand rechtfertigt. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher Registrierungslösungen sowohl für markerbasiertes Tracking als auch für Tracking mit Koordinatenmessgeräten erarbeitet.

#### **5.1.4 Trackingkonfiguration des Unifeye SDK**

Der modulare Aufbau des Unifeye Frameworks ermöglicht die Anbindung beliebiger Trackingsysteme wie z. B. optischem Markertracking, Infrarottracking oder mechanischem Tracking. Unabhängig von der eingesetzten Trackingtechnologie werden Trackingsysteme identisch als ein abstraktes Sensor-Objekt behandelt. Ein Sensor-Objekt wird durch eine beliebige Anzahl von Sensorkoordinatensystemen definiert, welche jeweils ein Trackingtarget repräsentieren. Beispiele für Trackingtargets sind Marker im Fall vom Markertracking oder Infrarottragers beim Infrarottracking.

Die Konfiguration des Trackingsystems wird deskriptiv in einer XML-Datei vorgenommen, in der als Hauptknoten die beiden Elemente Sensoren und Verbindungen definiert sind. Der Sensorknoten definiert Sensortypen und ordnet diesen jeweils Sensorkoordinatensysteme zu. Im Verbindungsknoten der Konfigurationsdaten erfolgt die Definition von Trackingkoordinatensystemen (KOS) und deren Verknüpfung mit einer beliebigen Anzahl von Sensorkoordinatensystemen. In jeder Verknüpfung können zusätzliche Transformationen definiert werden, um beispielsweise Transformationen für eine Target-Kamera-Kalibrierung (vgl. Kapitel 4.3.3.2) oder einen Offset zum Weltkoordinatensystem zu beschreiben.

Dieses Trackingkonzept ermöglicht zum einen hybrides Objekttracking durch Zuweisung unterschiedlicher Sensortypen zum selben Trackingkoordinatensystem, und zum anderen Ausfallsicherheit durch Überbestimmung. Beim optischen Markertracking lassen sich so beispielsweise mehrere Trackingtargets auf dasselbe Koordinatensystem referenzieren. So ist es möglich das Tracking auch dann aufrecht zu erhalten, wenn die Verbindung zu einzelnen Targets unterbrochen wird. Zudem stellt das Markertracking einen Sonderfall dar, da die zur Visualisierung eingesetzte Kamera dem Sensor entspricht und die Transformation der Sensor-Kamera-Kalibrierung somit der Einheitsmatrix entspricht.

### 5.2 Entwicklung einer markerbasierten Lösung

Optisches Markertracking (vgl. Abbildung 2-2, Seite 11) ist die meistgenutzte AR-Trackingtechnologie [HBT07, FDB08]. Sie zeichnet sich durch robuste Trackingergebnisse und geringe Kosten aus. In der Regel wird durch den verwendeten Marker ein Koordinatensystem auf der Markeroberfläche definiert, dessen XY-Ebene parallel zur Markerfläche orientiert ist. Bei der Entwicklung eines markerbasierten AR-Systems zur erfolgreichen Registrierung im vorliegenden industriellen Szenario sind zwei Fragestellungen zu beantworten. Erstens: Wie wird die Transformation des Markerkoordinatensystems zu einem Referenzsystem bekannt? Und Zweitens: Wie groß muss ein Marker sein, um diese Aufgabe mit der gewünschten Genauigkeit umzusetzen? Diese beiden Fragestellungen bilden den Kern des folgenden Abschnitts.

#### 5.2.1 Randbedingungen

Für die Registrierung von Markern im Weltkoordinatensystem existieren mehrere Lösungen [Pen08]. So lassen sich Marker nach der Montage mit Messwerkzeugen einmessen oder aber „nach Augenmaß“ durch Rotieren und Verschieben der zu überlagernde Geometrie an das Realbild anpassen. Ferner ist es möglich, die Marker so in der Realität zu montieren, dass ihre Position sofort bekannt ist. Die Montage in definierten Positionen wird durch den Einsatz von Adaptern möglich. Dabei handelt es sich um Hilfsgeometrien, die zum einen Träger des Trackingmarkers sind und zum anderen eine Passgeometrie aufweisen, die einen definierten Formschluss mit dem zu untersuchenden Objekt ermöglicht. Der Einsatz dieser Adapter wurde im Rahmen dieser Arbeit als viel versprechende Lösung für eine schnelle und präzise Registrierung im industriellen Umfeld identifiziert [PBR+08]. Dabei wird zwischen individuellen und allgemeinen Adaptern unterschieden.

Als individuelle Adapter können geometrische Objekte bezeichnet werden, die als Negativ mit mehr als einem Aufnahmepunkt passgenau an ein Referenzobjekt angelegt werden. Mit nur einem Adapter lassen sich so mitunter alle sechs Freiheitsgrade schnell und reproduzierbar bestimmen. Demnach eignen sie sich besonders bei Anwendungsfällen die ein häufiges Registrieren an baugleichen Objekten (wie zum Beispiel dem Vorderwagen eines Fahrzeugtyps, vgl. Abbildung 5-2) erfordern. Diese Eigenschaft wirkt sich bei der Untersuchung verschiedener Objekte nachteilig aus, da für jedes zu untersuchende Objekt ein eigener Adapter gefertigt werden muss.



Abbildung 5-2: Individuelle Markeradapter bei der AR-Untersuchung eines Vorderwagens [Volkswagen AG]

Der in Abbildung 5-2 dargestellte individuelle Adapter besteht aus einem Trägerprofil, vier Trackingmarkern und zwei Aufnahmedornen, die ein exaktes Positionieren in den Aufnahmen der Radaufhängung ermöglichen. Der Adapter kann an allen Fahrzeugen dieses Typs wiederverwendet werden. Zur Untersuchung eines weiteren Fahrzeugtyps ist ein anderer Adapter nötig, der individuell an dieses Fahrzeug angepasst ist.

Abbildung 5-3 zeigt einen Satz von allgemeinen Geometrieadaptern aus dem Bereich der Photogrammetrie. Jedes Adapterelement trägt photogrammetrisch antastbare Punkttargets und lässt sich in einer definierten Position an einer Regelgeometrie anfügen.



Abbildung 5-3: allgemeine Photogrammetrieadapter für Regelgeometrie [CAP11]

Im linken Teil der Abbildung 5-3 sind Adapter dargestellt mit denen beliebige Kanten, Zylinder und Bohrungen an verschiedenen Werkstücken angetastet werden können. Im rechten Bildteil kommt ein magnetischer Zylinderadapter zur Vermessung eines Dorns zum

Einsatz. Allgemeine Adapter ermöglichen das Antasten geometrischer Objektfeature wie Kanten oder Bohrungen. Mit der Kenntnis eines Featureelements lassen sich selten mehr als drei Freiheitsgrade gleichzeitig bestimmen, so dass für eine erfolgreiche 6D-Registrierung mehrere Adapter benötigt werden. Zur Bestimmung aller sechs Freiheitsgrade ist die Berechnung der Orientierung mehrerer Adapter zueinander notwendig. Obgleich Rüst- und Berechnungsaufwand somit größer sind als bei individuellen Adaptern ist dieser allgemeine Lösungsansatz flexibler. Er ist empfehlenswert wenn geometrisch verschiedene Objekte untersucht werden sollen, die ähnliche Featureelemente aufweisen.

Im analysierten Anwendungsfall gibt es individuelle Vorrichtungen, die identische Featureelemente in Form von standardisierten Referenzbohrungen aufweisen (vgl. Kapitel 4.1.3, Abbildung 4-7, Seite 77). Das gleiche gilt für Fabrikhallen, von denen jede individuell ausgeführt ist, jedoch standardisierte Feature zur Definition von Hallenmesspunkten besitzen (vgl. Kapitel 4.1.3, Seite 76, Abbildung 4-6). Diese Randbedingungen legen die Verwendung von allgemeinen Markeradaptern zum Antasten der standardisierten Messfeature des Anwendungsszenarios nahe.

Für die konkrete Auslegung der allgemeinen Adapter ist weiterhin die Frage nach der notwendigen Markergröße zu beantworten. Die Größe des Markers hat einen wesentlichen Einfluss auf die Trackinggenauigkeit, da diese direkt von der Anzahl der Markerpixel im Bild abhängig ist [Pen08]. Nach Pentenrieder nimmt die Trackinggenauigkeit bei steigender Markergröße bis zu einem gewissen Schwellwert stetig zu (vgl. Abbildung 5-4).

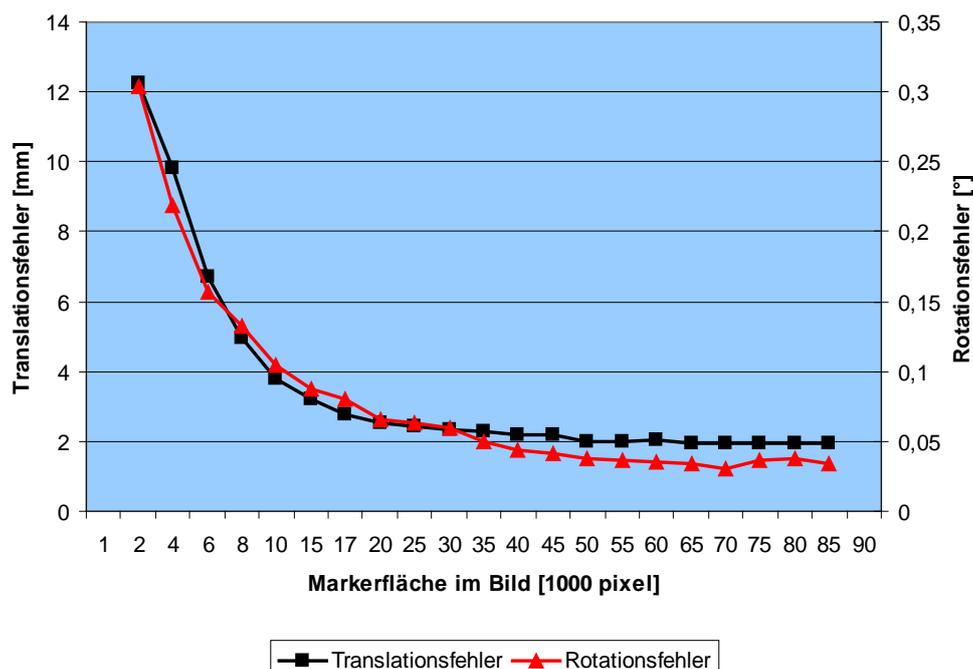


Abbildung 5-4: Abhängigkeit der Trackinggenauigkeit von den Markerpixeln im Bild, Entwurf nach [Pen08]

Abbildung 5-4 stellt den Einfluss der Markerpixel auf die Trackinggenauigkeit dar. Beim Unifeye SDK<sup>17</sup> Markertracking ist ab einem Grenzwert von ca. 30.000 Markerpixeln im Bild keine signifikante Steigerung der Trackinggenauigkeit mehr zu verzeichnen. 30.000 Pixel bedeuten bei Frontalablichtung eine Markergröße von ca. 173 x 173 Pixel Kantenlänge. Die Anzahl der Markerpixel im Bild ist wiederum von den Parametern Aufnahmeabstand, Markergröße, Brennweite und Kameraauflösung abhängig. Mit der Randbedingung einer Kantenlänge von 173 Pixeln im Bild und den Informationen über Kamerabrennweite (f)<sup>18</sup> und den Aufnahmeabstand (s) lässt sich die reale Kantenlänge (k) eines Marker wie folgt errechnen:

$$k = \left( \frac{173}{f} s \right) \quad (5.1)$$

Gleichung 5.1 gilt im Idealfall, wenn der Marker frontal fotografiert und so mit voller Fläche abgebildet wird. Im Normalfall werden Marker perspektivisch gekippt aufgenommen, so dass nicht die komplette Markerfläche zum Tracken genutzt werden kann. Um diese schräge Aufnahme zu kompensieren und dennoch die nötige Anzahl von Markerpixeln im Bild zu erreichen, sollte der Marker um etwa zehn Prozent größer sein:

$$k = \left( \frac{173}{f} s \right) 1,1 \quad (5.2)$$

Sofern der Aufnahmeabstand und die technischen Parameter der zu verwendenden Kamera bekannt sind, lässt sich mit der Gleichung 5.2 die notwendige Markergröße für ein optimales Trackingergebnis exakt bestimmen.

Für die Echtzeitvisualisierung von AR-Szenen werden beispielsweise Industriekameras der Firma AVT mit Objektiven kurzer Brennweite eingesetzt [BH08]. Bei fotobasierten Systemen finden hingegen hochauflösende digitale Spiegelreflexkameras wie die Modelle D200 oder D3 der Firma Nikon Verwendung. In einer Arbeitsentfernung von zwei Metern lässt sich mit den genannten Geräten eine Objektfläche von fünf bis elf Quadratmetern abbilden. Diese Fläche entspricht der Größe von mittleren bis großen Betriebsmittelvorrichtungen aus dem Karosseriebau einer Automobilfertigung (vgl. Kapitel 4.1.2). Für gängige Abstände und Kameras ergibt sich damit der in Tabelle 5-2 dargestellte Zusammenhang.

<sup>17</sup> Messreihe gültig für Unifeye SDK Version 3.5.

<sup>18</sup> Die Kamerabrennweite wird ohne Einheit in Pixel angegeben. Die absolute Größe eines Pixels ist für jede Kamera individuell durch die Kantenlänge eines Pixels auf dem Kamerasensor definiert. Die Brennweite in Pixel ergibt sich aus der Multiplikation der Pixelgröße mit der bekannten Brennweite des genutzten Objektivs.

Tabelle 5-2: Beispielberechnung der Markergröße in Abhängigkeit von Arbeitsentfernung und Brennweite

Kamera, Brennweite, Brennweite in Pixel	AVT Oscar, 6,4 mm, 1855 Px	AVT Pike, 6 mm, 811 Px	Nikon D200, 20 mm, 3281 Px	Nikon D3, 18 mm, 2128 Px
Aufnahmeabstand				
1000 mm	102,59 mm	234,65 mm	58,00 mm	89,43 mm
2000 mm	205,18 mm	469,30 mm	116,00 mm	178,85 mm
3000 mm	307,76 mm	703,95 mm	174,00 mm	268,28 mm
4000 mm	410,35 mm	938,59 mm	232,00 mm	357,71 mm
10000 mm	1025,88 mm	2346,49 mm	580,01 mm	894,27 mm
50000 mm	5129,38 mm	11732,43 mm	2900,03 mm	4471,33 mm

Je nach verwendeter Kamera sollten für das vorliegende Szenario mit einer Arbeitsentfernung von ca. 2m laut Tabelle 5-2 Marker mit einer Kantenlänge von 116 bis 469 Millimetern verwendet werden. Bei einer Arbeitsentfernung ab zehn Metern, sollte die Kantenlänge der Marker bei optimalem Setup (Nikon D200,  $f = 20\text{mm}$ ) mindestens 580 Millimeter betragen.

Tabelle 5-2 verdeutlicht, dass die notwendigen Markergrößen bei Aufnahmeabständen von mehr als zehn Metern nur schwer realisierbar und für den produktiven Einsatz nicht praktikabel sind. So ist der Einsatz des Unifeye-Markertrackings nur für den Nahbereich zur Untersuchung einzelner Vorrichtungen sinnvoll. Damit erübrigt sich der Bedarf nach Markeradaptern, die sich an den Featureelementen der Hallensäulen montieren lassen.

### 5.2.2 Systemsetup

Zur exakten Positionierung von Trackingmarkern werden im Rahmen der Arbeit allgemeine Adapter konstruiert, mit denen sich die Marker wiederholgenau in den Referenzbohrungen der Grundplatten von Betriebsmittelvorrichtungen anbringen lassen (vgl. Kapitel 4.1.3). Die Referenzbohrungen von Karosseriebauvorrichtungen des genannten OEMs haben einen standardisierten Durchmesser von acht Millimetern mit der Bohrungstoleranz H8. Zum Einführen in diese Referenzbohrungen besitzen die Adapter einen gehärteten Stift mit einem Durchmesser von acht Millimetern und der Wellentoleranz h9 für eine Spielpassung (H8 / h9) mit hoher Sitzgenauigkeit<sup>19</sup>. Abbildung 5-5 zeigt Konstruktionszeichnungen (links und mitte) und einen gefertigten Betriebsmitteladapter.

<sup>19</sup> Passungen entsprechend DIN ISO 286.

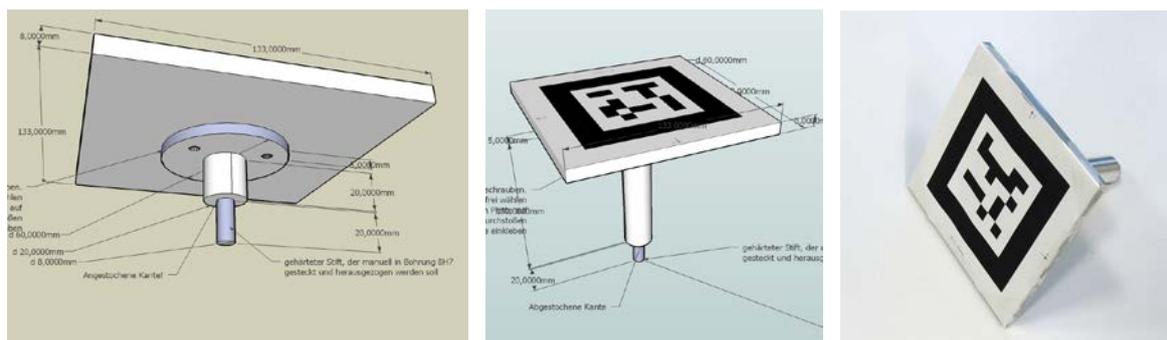


Abbildung 5-5: allgemeine Markeradapter für Karosseriebauvorrichtungen [eigener Entwurf]

Es werden jeweils acht Adapter mit einer Schaftlänge von 30 mm (Abbildung 5-5, links) bzw. 110 mm (mitte) gefertigt. Adapter mit längerem Schaft können an Referenzbohrungen angebracht werden, die aufgrund von Störkonturen wie z.B. Kabelkanälen nicht direkt auf der Betriebsmittelgrundplatte angetastet werden können. Auf der Adapteroberseite sind optische Marker aufgebracht. Die Marker besitzen eine kratzfeste, entspiegelte Oberfläche. Abbildung 5-6 zeigt das komplette Setup in Transportkoffern (Markeradapter rechts im Bild).



Abbildung 5-6: Setup AR-System: Kamera und Laptop (li); Adapter mit Markern (re) [eigene Aufnahme]

Als Erfassungssystem wird die digitale Spiegelreflexkamera Nikon D200 eingesetzt. Sie besitzt eine Auflösung von 3872 x 2592 Pixel. In Verbindung mit einem manuellen Objektiv mit einer kurzen Brennweite von 20mm ergibt sich ein Bild- bzw. Öffnungswinkel von 168,07°, so dass Betriebsmittelvorrichtungen in engen Bauräumen auch bei kurzem Arbeitsabstand vollständig erfasst werden können. Zur Ausleuchtung der Szene wird das externe Blitzgerät Nikon SB-800 mit externem Akkupack eingesetzt. Zum mobilen Setup gehört weiterhin ein Laptop der Fa. Sony (Vaio VGN-TZ31WN<sup>20</sup>).

<sup>20</sup> Intel® Core™2 Duo CPU U7600 1,2 GHz; 2 GB RAM; WinXP SP3; 64 MB Intel® Mobile Graphics (945)

### 5.2.3 Systemkalibrierung

In Kapitel 4.3.3 wird erläutert, dass optische Systeme physikalisch bedingte Verzeichnungen aufweisen. Die Verzeichnungsparameter werden durch eine Kamerakalibrierung ermittelt und mit Hilfe von Korrekturtermen ausgeglichen. Ferner unterliegt die Herstellung der beschriebenen Markeradapter gewissen Fertigungstoleranzen. Für eine korrekte Registrierung wird jedoch die exakte Transformation des Markers zum Adapterreferenzpunkt benötigt. Diese wird durch eine individuelle Kalibrierung jedes Markeradapters ermittelt.

#### 5.2.3.1 Kalibrierung des optischen Systems (Kamerakalibrierung)

Zur Kamerakalibrierung werden 16 bis 24 formatfüllende Aufnahmen eines bekannten Referenzpunktfeldes erstellt. Das Referenzpunktfeld befindet sich auf einer Kalibrierplatte der Fa. AICON 3D-Systems, die in Verbindung mit der Photogrammetriesoftware AICON 3D-Studio am Markt verfügbar ist. Die Aufnahmen ermöglichen eine Messung der Verzeichnungsparameter nach dem in [God02] beschriebenen Verfahren (s. Kapitel 4.3.3.1).

#### 5.2.3.2 Kalibrierung der Adapter

Die Adapterkalibrierung gleicht fertigungsbedingte Fehlereinflüsse aus. Abbildung 5-7 zeigt schematisch einen Vorrichtung-Marker-Adapter und eine Referenzbohrung auf einer Betriebsmittelvorrichtungsgrundplatte im unmontierten (links) und montierten Zustand (rechts).

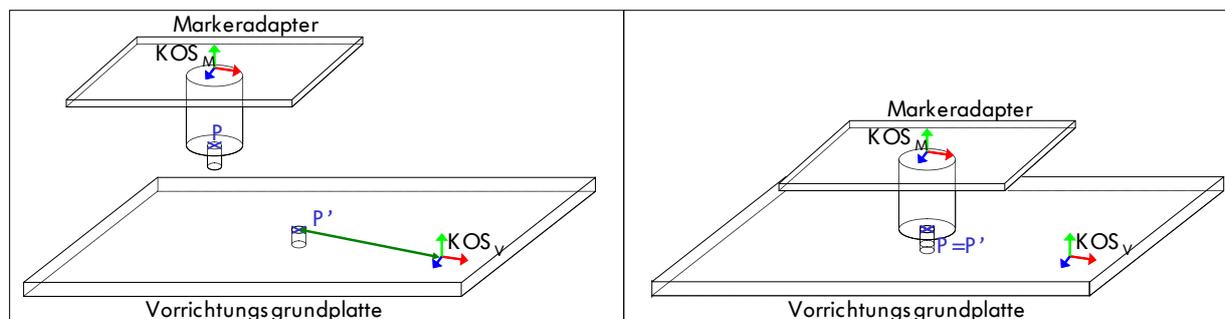


Abbildung 5-7: Markeradapter und Vorrichtungsgrundplatte (li. einzeln; re. montiert) [eigener Entwurf]

Der Mittelpunkt der Referenzbohrung  $P'$  ist bekannt und im Koordinatensystem der Vorrichtung  $KOS_V$  beschrieben. Im montierten Zustand ist der Punkt  $P'$  deckungsgleich mit dem Adapterreferenzpunkt  $P$  (rechts in Abbildung 5-7). Der Adapterreferenzpunkt  $P$  befindet sich im Stift an der Adapterunterseite. Das Trackingsystem ermittelt die Markerpose, und somit den Ursprung des Markerkoordinatensystems  $KOS_M$ . Die Adapterkalibrierung dient, dazu die Koordinaten des Punktes  $P$  im Markerkoordinatensystem  $KOS_M$  für jeden vorhandenen Adapter exakt zu ermitteln.

Das direkte Messen des Vektors zu  $\vec{P}$  ist nicht möglich, da sich der Punkt P im Werkstückinneren befindet. Unter der Annahme dass P im montierten Zustand P' entspricht, kann  $\vec{P}$  wie in Abbildung 5-8 dargestellt mit Hilfe einer Kalibrierplatte indirekt vermessen werden.

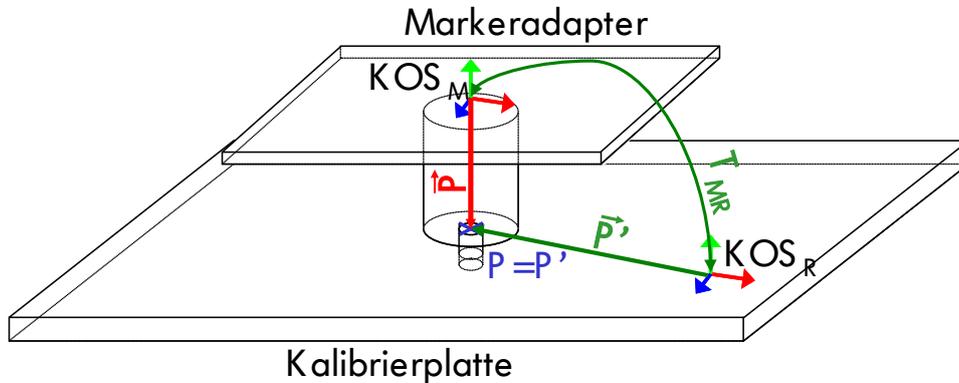


Abbildung 5-8: Konzept zur Vermessung des Adapterreferenzpunktes P [eigener Entwurf]

Die Kalibrierplatte besitzt ein Referenzkoordinatensystem ( $KOS_R$ ), das durch Passpunkte auf der Kalibrierplatte beschrieben wird. Ferner ist eine Referenzbohrung vorhanden, deren Mittelpunkt P' in  $KOS_R$  beschrieben ist. Ist die Transformationsvorschrift von  $KOS_M$  zu  $KOS_R$  bekannt, so kann  $\vec{P}$  durch Anwendung der Transformation auf  $\vec{P}'$  ermittelt werden.

Abbildung 5-9 zeigt die Kalibrierplatte bei der Vermessung mit einem photogrammetrischen System<sup>21</sup>. Auf der Kalibrierplatte sind optische Marker und photogrammetrische Targets aufgebracht, die  $KOS_R$  definieren. Der Mittelpunkt der Referenzbohrung (P') wird ebenfalls photogrammetrisch angetastet, wobei ein allgemeiner Halbkugeladapter zum Einsatz kommt (TargetID 1008 rechts in Abbildung 5-9).

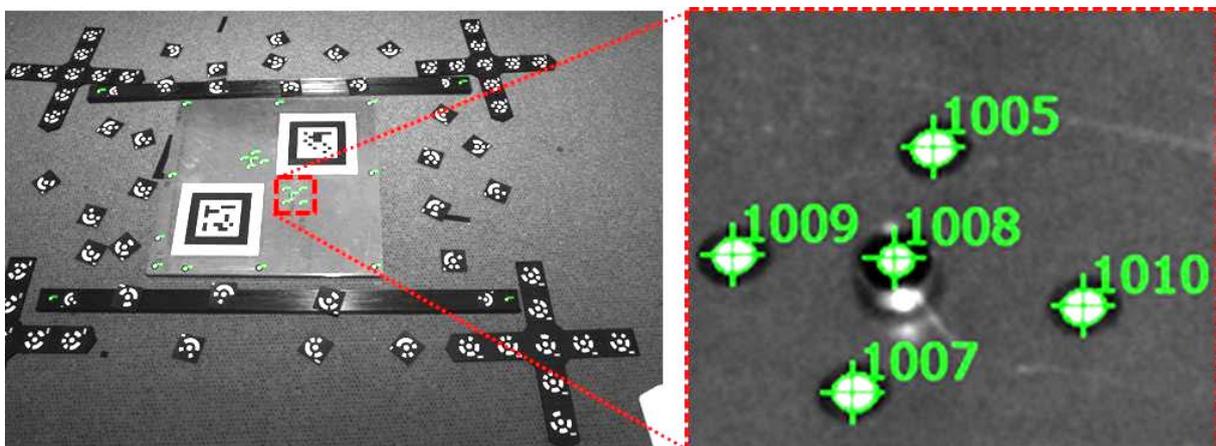


Abbildung 5-9: Vermessung der Kalibrierplatte (li) mit Referenzbohrungsmittelpunkt P' (re) [eigener Entwurf]

<sup>21</sup> eingesetzt wurde das System TRITOP der Fa. GOM.

## 5 Verbesserung des Registrierungsprozesses

Im Anschluss wird ein Betriebsmitteladapter auf der Kalibrierplatte montiert und weitere Aufnahmen zur photogrammetrischen Vermessung erstellt (vgl. Abbildung 5-10). Durch Kantenerkennung wird das Koordinatensystem des verwendeten Adaptermarkers eingemessen.

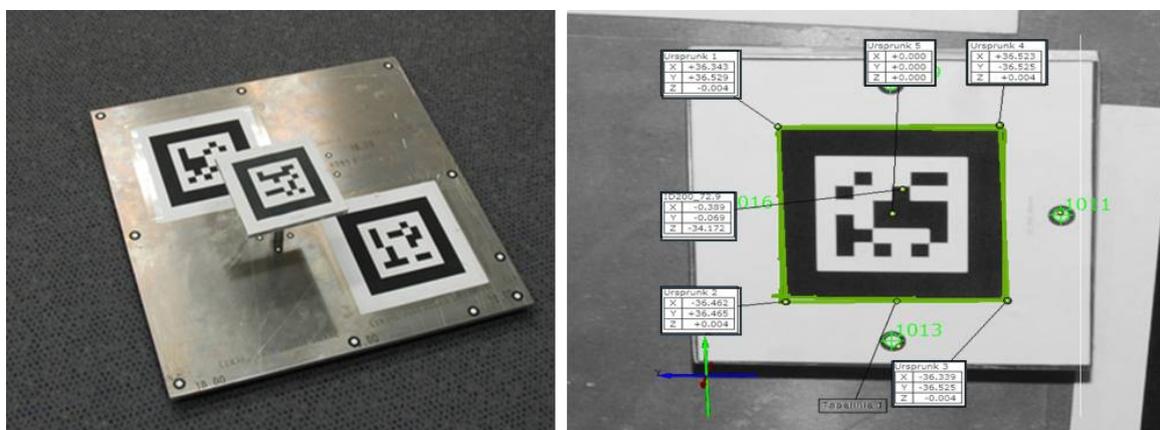


Abbildung 5-10: Vermessung eines Markeradapters auf Kalibrierplatte [eigener Entwurf]

Die gesuchte Transformation ( $T_{MR}$ ) zwischen den beiden Koordinatensystemen  $KOS_R$  und  $KOS_M$  wird durch das Photogrammetriesystem ermittelt, so dass der vermessene Referenzpunkt  $P'$  im Koordinatensystem des Adaptermarkers beschrieben wird.

Als Kalibrierergebnis liegen die individuellen Transformationswerte jedes Markeradapters zum zugehörigen Adapterreferenzpunkt  $P$  vor. Tabelle 5-3 zeigt einen Auszug der kalibrierten Transformationswerte für vier Adapter.

Tabelle 5-3: Kalibrierergebnisse der Betriebsmitteladapter (Auszug)

Marker ID	Kantenlänge [mm]	Bohrung [mm]	Schaftlänge [mm]	Adaptertransformation		
				X [mm]	Y [mm]	Z [mm]
11	100	8	110	-0,329	-0,593	-113,271
12	100	8	110	-0,229	0,564	-113,173
200	72,9	8	30	-0,389	-0,069	<b>-34,172</b>
201	72,9	8	30	0,485	0,046	-33,128

Die Kalibrierergebnisse verdeutlichen die fertigungsbedingten geometrischen Abweichungen der Betriebsmitteladapter vom Konstruktionsstand. Besonders auffällig ist die Abweichung in z-Richtung. So wird die konstruierte Schaftlänge bis zu **4,172** mm überschritten. Mit Kenntnis der Transformationswerte lässt sich ein Betriebsmittelreferenzpunkt mit einer Genauigkeit von wenigen zehntel Millimetern durch einen Adapter antasten. Die Transformationswerte werden in einer Trackingkonfigurationsdatei gehalten und zur Berechnung der Registrierung im Betriebsmittelkoordinatensystem im Rahmen der Intermarkerkalibrierung herangezogen.

### 5.2.3.3 Intermarkerkalibrierung

Ein Betriebsmitteladapter definiert exakt einen 3D-Punkt im Raum und somit drei Freiheitsgrade. Zur Bestimmung aller sechs räumlichen Freiheitsgrade werden drei Raumpunkte benötigt, so dass eine Registrierung über 3D-3D-Korrespondenzen möglich ist (vgl. Kapitel 2.4.5.2). So sind zum Bestimmen aller sechs Freiheitsgrade mindestens drei Adapter an einer Betriebsmittelvorrichtung zu montieren. Für ein Foto, das diese drei Adaptermarker komplett abbildet, lässt sich die Kamerapose in Betriebsmittelkoordinaten berechnen. Jedoch ist das Erstellen von Aufnahmen, die stets drei Adaptermarker abbilden, nicht realistisch. Nach der Betriebsmitteluntersuchung stehen Fotos zur Verfügung die zum Teil nur einen oder zwei Adaptermarker enthalten. Der Prozess der Intermarkerkalibrierung dient dazu, alle in der Szene vorkommenden Markerposen in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformieren. Dazu werden alle in einem Bild vorkommenden Markerposen über das Kamerakoordinatensystem zueinander zu vermessen. Anschließend erfolgt eine Vernetzung über identische Marker in unterschiedlichen Bildern.

### 5.2.4 Registrierungsprozess

Zunächst werden mindestens drei Referenzbohrungen zugänglich gemacht und die beigestellten Referenzpunktkoordinaten dokumentiert (siehe Abbildung 5-11).

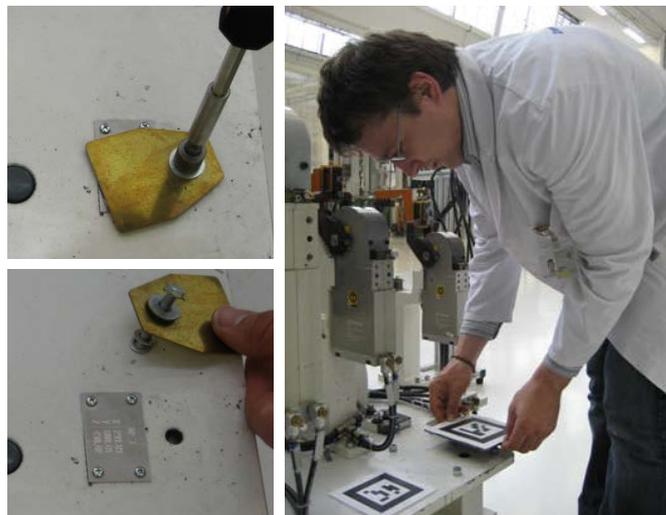


Abbildung 5-11: Montieren eines Betriebsmitteladapters an einer Referenzbohrung [eigene Aufnahme]

Der linke Teil der Abbildung zeigt wie die Schutzabdeckung einer Referenzbohrung entfernt wird, die neben der Bohrung selbst auch ein Schild mit den eingestanzten Referenzkoordinaten vor Verschmutzung schützt. Der rechte Bildteil stellt dar wie ein Adapter in die Referenzbohrung eingeführt wird.

Der Untersuchungsbereich wird mit zusätzlichen Markern ausgestattet, die den Prozess der Intermarkerkalibrierung unterstützen. Alle Markerinformationen werden in einem Datenerfassungsblatt dokumentiert (s. Anhang A.2). Es folgt das Fotografieren der Szene aus unterschiedlichen Blickwinkeln und Entfernungen. Dabei bildet jede Aufnahme mehrere Marker (mindestens zwei) vollständig ab. Es werden so viele Aufnahmen erstellt, bis jeder in der Szene vorkommende Marker mindestens dreimal abgebildet ist und über die Bilder eine Vernetzung aller Marker in der Szene möglich ist. Im Anschluss erfolgt die 3D-3D-Registrierung über die korrespondierenden Betriebsmittel- und Adapterreferenzpunkte (Abbildung 5-13).

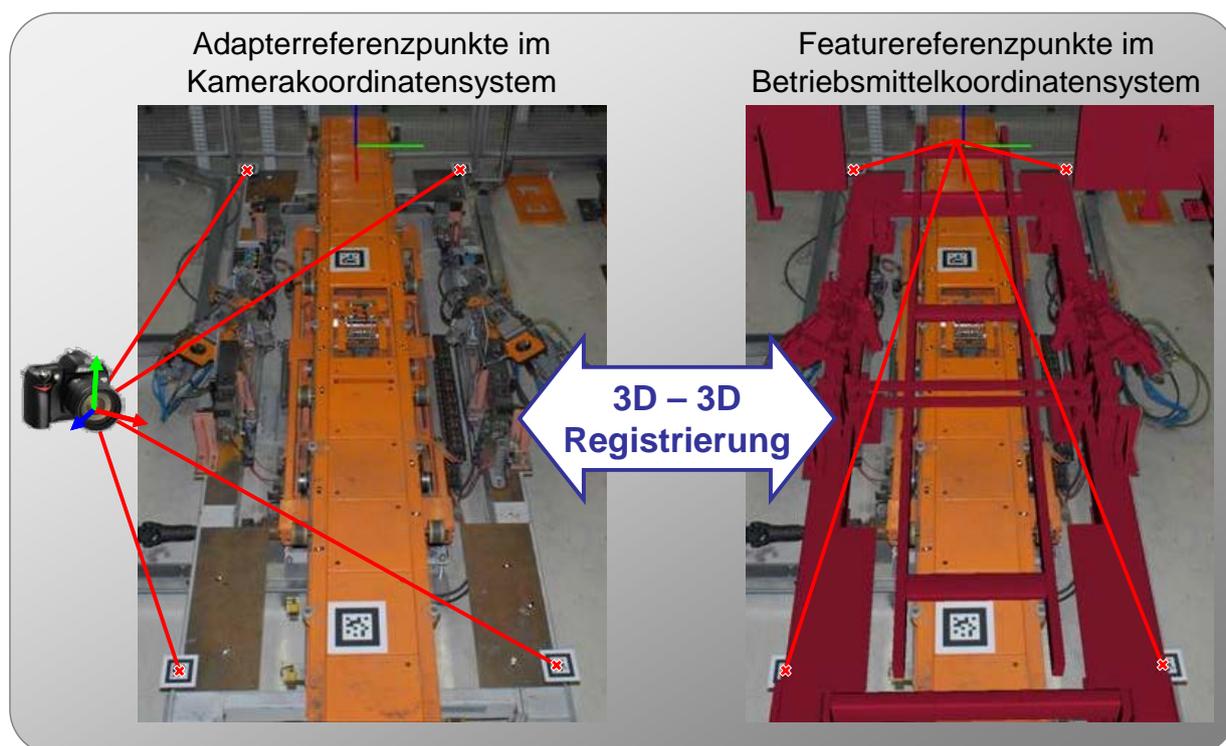


Abbildung 5-12: Konzept der 3D-3D-Registrierung (eigener Entwurf nach [Pen08])

Abbildung 5-12 zeigt das Konzept der 3D-3D-Registrierung. Der Registrierungsalgorithmus nutzt die Aufnahmen der Szene mit Adaptermarkern an bekannten Referenzbohrungen und eine Liste der korrespondierenden digitalen 3D-Koordinaten zur Berechnung der Transformation zwischen Kamera- und Modellkoordinatensystem. Dieser Schritt lässt sich mit dem Prozess der Intermarkerkalibrierung kombinieren. So entspricht das das Zielkoordinatensystem der Intermarkerkalibrierung dem Betriebsmittelkoordinatensystem.

Der beschriebene Algorithmus wurde auf Basis des Unifeye SDK in Form des Intermarker-Calibration-Tools implementiert (Abbildung 5-13). Das Tool verarbeitet die verfügbaren Bilddaten und bestimmt für jeden Marker dessen Position im Kamerakoordinatensystem.

Diese Positionen fließen gemeinsam mit den Referenzpunktkoordinaten in einen 3D-3D-Transformationsoptimierungsalgorithmus ein. Die resultierende Transformation referenziert das Kamerakoordinatensystem zum digitalen Betriebsmittelkoordinatensystem. Auf dieser Basis wird für jeden Marker die Transformation zum Betriebsmittelkoordinatensystem berechnet. Das Berechnungsergebnis wird als Tracking-Konfigurationsdatei gespeichert. Die implementierte Version des Tools führt neben der 3D-3D-Registrierung auch einen Optimierungsprozess über alle konfigurierten Marker über alle Bilder aus. Weiterführende Informationen dazu finden sich in [Pen08].

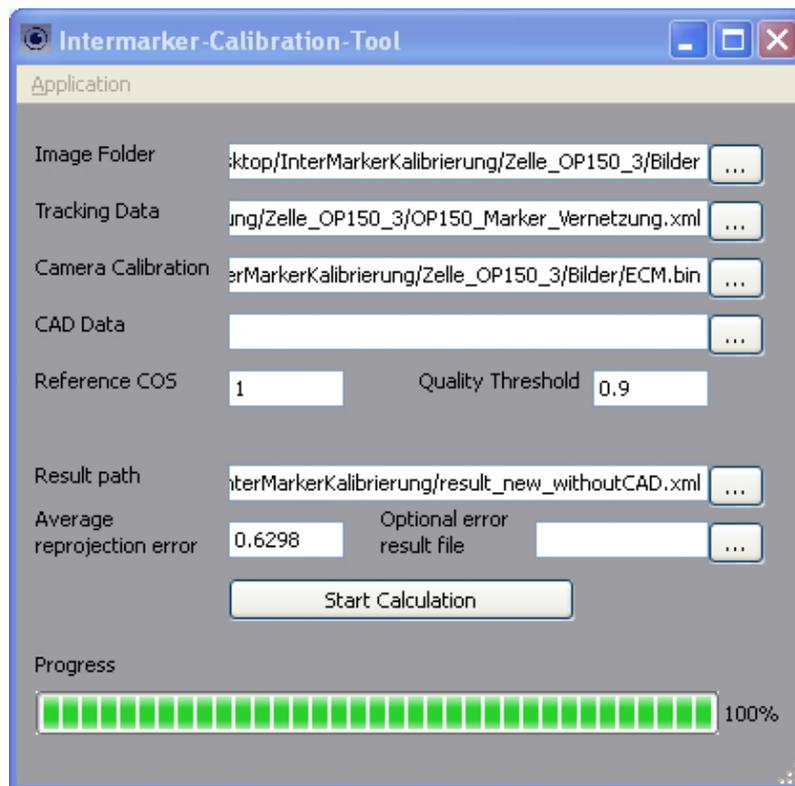


Abbildung 5-13: Intermarker-Calibration-Tool zur 3D-3D-Registrierung [Pen08]

Die folgenden Größen fließen in die Berechnung ein:

- Ein Bilderordner mit Fotos des zu untersuchenden Szenarios (*Image Folder*),
- Kalibrierdaten für das optische System (*Camera Calibration*),
- 3D-Koordinaten der Referenzpunkte im Betriebsmittelkoordinatensystem (*CAD Data*) und
- Marker-Konfigurationsdaten mit Informationen zu den verwendeten Markern sowie den kalibrierten Adapteroffsets (*Tracking Data*)

Abbildung 5-14 gibt einen Überblick über die einzelnen Prozessschritte der Registrierung von Betriebsmitteladaptern und fasst die Ausführungen dieses Abschnitts zusammen. Ein Teil der zur Registrierung notwendigen Informationen kann erst generiert werden nachdem die Referenzbohrungen zugänglich gemacht sind. Die Prozessschritte zur Markeradapter- und Kamerakalibrierung können unabhängig von der Untersuchung als vorbereitende Tätigkeiten durchgeführt werden.

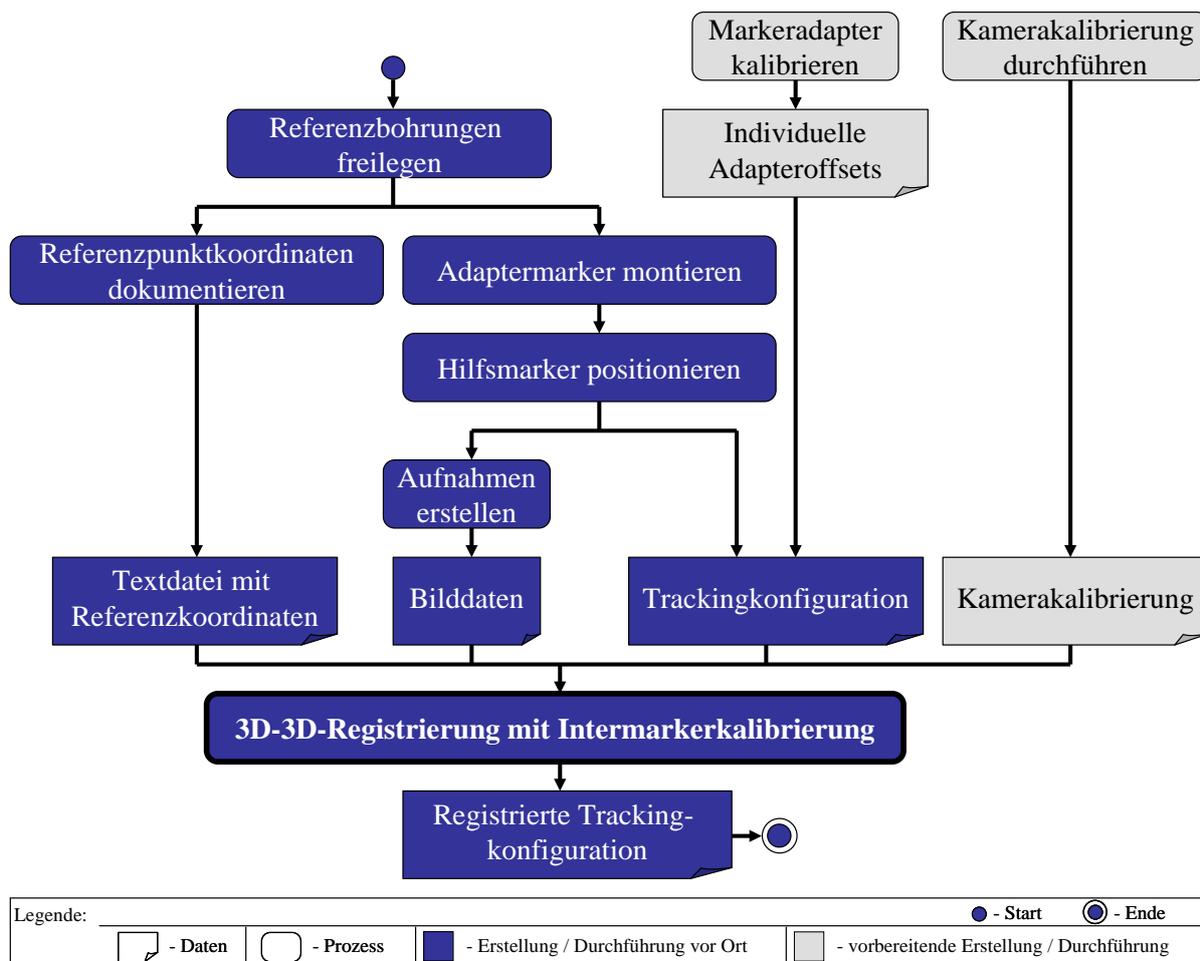


Abbildung 5-14: Prozessschritte zur Registrierung mit Vorrichtungsadaptern [eigener Entwurf]

Der aufgezeigte Registrierungsprozess wurde in mehreren Pilotprojekten erfolgreich getestet. Im Folgenden wird die Anwendung in einem ausgewählten Projekt beschrieben.

### 5.2.5 Evaluierung im Pilotprojekt

Im Rahmen einer Produktaufwertung sollte eine Spannvorrichtung um zusätzliche Spannstellen und Bauteilauflagen ergänzt werden. Abbildung 5-15 zeigt die Vorrichtung in Frontalansicht der Konstruktionszeichnung (links) und im Serienbetrieb innerhalb einer Anlage (rechts). Konkret handelte es sich um eine Seitenteilvorrichtung, in der Innen- und

Aussenblech eines Fahrzeugseitenteils eingelegt und im Anschluss von Robotern durch Wärmepunktschweißen geometrieegebend gefügt wurden. Zur Absicherung der Änderungskonstruktion wurde die Vorrichtung mit Hilfe des oben beschriebenen fotobasierten Augmented Reality Systems untersucht.



Abbildung 5-15: Szenario Pilotprojekt 1 - Seitenteilspannvorrichtung [Volkswagen AG, eigene Aufnahme]

Ziele des Soll/Ist-Vergleiches waren das Aufzeigen von Abweichungen der realen Vorrichtung zu vorhandenen Planungsdaten, sowie eine Störkantenanalyse für die neu einzubauenden Spanner und Bauteilauflagen. Der Untersuchungsprozess wird im Folgenden detailliert beschrieben.

### 5.2.5.1 Vorbereitung

Die betreffende Vorrichtung wurde zunächst vor Ort besichtigt, wobei die zu untersuchenden Umfänge mit den Sachverständigen (Konstrukteur und Anlagenbetreiber) abgestimmt wurden. Danach wurde die Verfügbarkeit aktueller Planungsdaten sichergestellt und ein Termin für die eigentliche Untersuchung festgelegt.

Bei der Vorortbegehung wurde festgestellt, dass nicht alle auf der Vorrichtungsgrundplatte vorhandenen Referenzbohrungen frei zugänglich sind. Nur zwei Referenzbohrungen waren frei zugänglich während zwei andere durch Kabelkanäle und eine weitere durch Druckluftleitungen verdeckt wurden. Für die Registrierung wurden zwei der verdeckten Referenzpunkte ausgewählt, die vor der Untersuchung durch den Anlagenbetreiber bzw. die Instandhaltung freizulegen waren.

### Datenbeschaffung

Im Anschluss erfolgte die Beschaffung der CAD-Geometrien im benötigten JT oder VRML 2.0 Format. Der Export dieser Formate war mit den einschlägigen CAD-Systemen möglich und lag bei Volkswagen zudem für jedes konstruierte Teil als webbasierten Dokumentation innerhalb der Digitalen Fabrik vor. Für die betreffende Vorrichtung wurden 19 Geometrie-

objekte (Grundplatte, Spannerstellen, Schweißspanner, Bauteilauflagen, Konturstücke und Konsolen) exportiert. Die Koordinaten der Referenzbohrungen auf der Vorrichtungsgundplatte waren im Fahrzeugkoordinatensystem angegeben.

### **Kamerakalibrierung**

Für die Aufnahme der Vorrichtungsbilder wurde die digitale Spiegelreflexkamera Nikon D200 mit externem Blitzgerät verwendet. Die Kamera, mit der eine Auflösung von zwölf Megapixeln erreicht wird, wurde wie in Kapitel 4.3.3.1 beschrieben mit der Software *AICON 3D Studio* kalibriert.

#### **5.2.5.2 Durchführung / Erfassung**

Zur Registrierung wurden vier Referenzbohrungen festgelegt, von denen zwei durch Kabelkanäle verdeckt waren. Ein Mitarbeiter der Instandhaltung löste die Kabelkanäle temporär. Die Referenzpunktkoordinaten waren auf der Grundplatte dokumentiert und wurden wie vorgesehen als Input für das Intermarker-Calibration-Tool im Datenerfassungsblatt (Anhang A.2) dokumentiert. Im Anschluss wurden vier Markeradapter an der vertikal aufgestellten Grundplatte montiert. Zusätzlich wurden fünf Marker ohne Adapter als Stützmarker in der Szene verteilt. Es folgte die Aufnahme aller interessierenden Bereiche auf der Vorrichtung, wobei insbesondere die Bereiche betrachtet wurden, in denen die neuen Spannvorrichtungen installiert werden sollten. Die Erfahrung hat gezeigt, dass dabei die Anwesenheit eines Experten bzw. Konstrukteurs sinnvoll ist, um sämtliche Problemstellen aus den benötigten Perspektiven zu erfassen. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden insgesamt 83 Aufnahmen erstellt; 35 (41,2%) davon wurden für die Einmessung der Vorrichtungsmarker verwendet.

#### **5.2.5.3 Auswertung**

Nach der Datenerfassung wurden die Intermarkerkalibrierung und Registrierungstransformation berechnet. Als Input zur Intermarkerkalibrierung dienten die Referenzpunktkoordinaten, die Kamerakalibrierungsdaten, die Trackingkonfiguration der fotografierten Marker sowie 35 ausgewählte Fotos, die eine Vernetzung aller verwendeten Marker ermöglichten. Als Ergebnis lag die zur Auswertung notwendige registrierte Trackingkonfiguration als XML-Datei vor. Das Zusammenstellen der AR-Szene erfolgte wie in Kapitel 4.3 beschrieben durch die grafische Nutzeroberfläche in den vier Schritten:

- Laden der Fotos durch Öffnen des entsprechenden Ordners im Dateisystem
- Laden der Kamerakalibrierung
- Laden der registrierten Trackingkonfigurationsdatei
- Laden der Geometriedaten des Betriebsmittels

Die Auswertung der Daten erfolgte gemeinsam mit den Planern und dem Konstrukteur, wobei zunächst eine rein optische Beurteilung der AR-Szene durchgeführt wurde. Abbildung 5-16 zeigt das AR-Szenario bei der Auswertung mit der Unifeye GUI. Die einzelnen Bilder wurden betrachtet und interessierende Geometrien eingeblendet. Die Verwendung von Occlusion-Geometrien erwies sich bei verdeckenden Objekten als sehr hilfreich, während die Darstellung als Drahtgittermodell einen guten Abgleich von virtuellem und realen Bauteil ermöglichte. Durch die bewusste Verwendung von Clipping Planes wurden Kollisionen erkannt und Abstände ermittelt. Besonders aufschlussreich war das Schneiden von neu geplanten Komponenten, da hier Kollisionen mit Teilen erkannt werden konnten, die bisher nicht als 3D-Modell in der digitalen Welt dokumentiert waren.

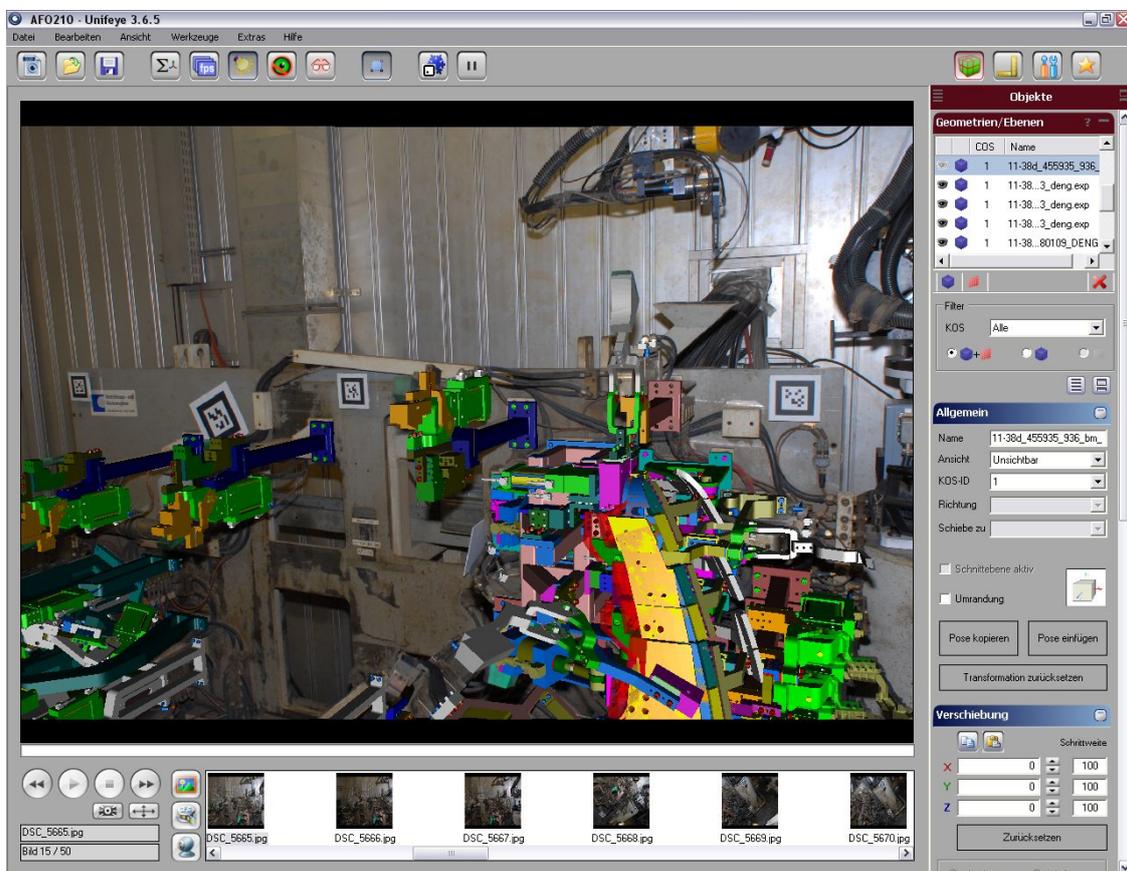


Abbildung 5-16: Analyse des AR-Szenarios; Überlagerung der Spanntechnik [eigene Aufnahme]

#### 5.2.5.4 Ergebnis

Es zeigte sich, dass die digitalen Planungsdaten die Realität weitgehend korrekt abbilden. Auf der Vorrichtung wurden jedoch zwei Abweichungen der Konstruktionsdaten von den realen Betriebsmitteln festgestellt. Zum einen war eine Spannstelle auf der Vorrichtung montiert, die nicht in den Konstruktionsdaten verzeichnet war. Zum anderen wich die Position der Kontursteine für die Frontseite des Seitenteils vom Modell ab ( $\Delta x=50\text{mm}$ ;  $\Delta z=35\text{mm}$ ).

Darüber hinaus waren vor allem Komponenten der Medienversorgung nicht im digitalen Modell erfasst. Bei der Seitenteilvorrichtung betraf dies insbesondere Kabelkanäle, Pneumatikleitungen, Absaugschläuche und Ventilbatterien. Die Berücksichtigung der potenziellen Störkonturen von Medienversorgungskomponenten und der oben genannten Spannstelle steigerte die Planungssicherheit bei der Integration zusätzlicher Betriebsmittel erheblich. Dadurch wurde eine termingerechte Installation ohne nachträgliche Änderungen sichergestellt.

### 5.2.6 Fazit

Die Durchführung eines fotobasierten Soll/Ist-Vergleichs durch Augmented Reality ist bei Änderungsplanungen von Vorrichtungen mit dem entwickelten Registrierungsprozess durchführbar und empfehlenswert. Die Registrierung in der Produktionsumgebung ist mit den Vorrichtungsadaptern innerhalb weniger Minuten möglich und liefert hinreichend genaue Trackingergebnisse. Positionsabweichungen ab 10mm werden durch den Anwender deutlich erkannt. Der Einsatz der Technologie verringert Änderungskosten und Umsetzungsaufwand, da nachträgliche Anpassungen vor Ort minimiert werden. In Einzelfällen kann die Konstruktionssicherheit von 80 % auf 98 % gesteigert werden [PBDM07].

Trotz der positiven Ergebnisse ist anzumerken, dass der Abgleich zwischen realen und virtuellen Objekten ein arbeitsintensiver manueller Prozess ist. Jedes Foto wird separat mit Teilmodellen in verschiedenen Darstellungsarten angereichert und jede Überlagerung durch den Anwender ausgewertet. Daraus leitet sich Handlungsbedarf zur Unterstützung des Auswerteprozesses ab. In folgenden Arbeiten ist zu untersuchen, ob eine automatisierte Auswertung von AR-Szenarien möglich und im vorliegenden Anwendungsfall realisierbar ist.

## 5.3 Entwicklung eines Systems mit Large Area Lasertracking

Im Rahmen des ARVIKA-Projekts bescheinigten Müller et al. laserbasierten Trackingssystemen bereits im Jahr 2000 großes Potenzial für den Einsatz in AR-Anwendungen [MLS+00]. Dennoch kommen laserbasierte Trackingsysteme bis heute selten zum Einsatz [FDB08, CFA+11]. Bekannte Anwendungen mit laserbasierten Tracking nutzen Laserscanner, um Inside-Out-Systeme zu implementieren [BEFW97, SM11]. Eine konkrete AR-Anwendung, bei der ein Lasertracker als Trackingsystem zum Einsatz kommt, ist bisher nicht bekannt.

Als Ursache werden die hohen Investitionskosten vermutet. Die große Reichweite, die Genauigkeit und bewährte Funktionen zur Einmessung in industriellen Umgebungen machen Lasertracker für die Anwendung im Fabrikplanungsumfeld besonders interessant. Das Einmessen des Lasertrackers über bekannte Referenzpunkte in einer Fabrikhalle dauert ca. 15 bis 30 Minuten. Damit ist die Registrierung für einen Arbeitsvolumen auf einer Fläche von ca. 250 Quadratmetern<sup>22</sup> schnell realisiert.

Im Rahmen der Arbeit wird ein Lasertracker in das AR-System integriert. Die größte Herausforderung dabei ist die Kalibrierung des Gesamtsystems und dabei insbesondere die Target-Kamera-Kalibrierung. Die mit dem Lasertracker erzielte Genauigkeit kann nur mit einer Kalibrierkette von durchgängig hoher Qualität für Soll/Ist-Vergleiche nutzbar gemacht werden.

### 5.3.1 Randbedingungen

Für die Registrierung des Lasertrackers existieren sowohl an Vorrichtungen als auch in der Fabrikhalle definierte Messpunkte, die ein standardisiertes Einmessen des Koordinatenmessgerätes ermöglichen. Für das Einmessen eines Punktes ist eine direkte Sichtverbindung zum Lasertracker notwendig (Line-of-Sight- bzw. LOS-Restriktion). In produktiv genutzten Fabrikhallen treten unter Umständen Verdeckungen auf, die ein direktes Einmessen erschweren. Im Gegensatz dazu ist das Messpunktnetz in neuen Hallen zum Teil nicht dicht genug, um das Einmessen des Lasertrackers aus allen erforderlichen Positionen zu ermöglichen. Für beide Fälle ist eine Strategie zur Einmessung mit unzureichender Referenzpunktverfügbarkeit zu entwickeln. Eine weitere Besonderheit von Hallenkoordinatensystemen ist die Position des Koordinatenursprungs. So ist es keine Seltenheit, dass Hallenmodelle unter Umständen mehrere Kilometer von ihrem Koordinatenursprung entfernt positioniert sind. Bei derartigen Distanzen führen leichte Messfehler in der Winkelbestimmung zu erheblichen Positionsabweichungen bei der Überlagerung weit entfernter Objektmodelle. Bei Videos führt das zum Springen oder Flackern der virtuellen Modelle. Dieser Seiteneffekt ist zu berücksichtigen.

Weiterhin erfordert die Untersuchung von Objekten mit unterschiedlichen Aufnahmeabständen eine angepasste optische Kalibrierung der eingesetzten Kamera. Entfernte Objekte (Aufnahmeabstand mehr als zehn Meter), die mit einer im Nahbereich kalibrierten Kamera (Kalibrierabstand ein bis zwei Meter) fotografiert werden, erscheinen in der Aufnahme unscharf. Folglich ist die Kamerakalibrierung auf den Fernbereich anzupassen.

---

<sup>22</sup> Bei einer Trackingreichweite von 40 Metern um den Tracker:  $40\text{m}^2 * 2 / \pi = 251,33\text{m}^2$

### 5.3.2 Systemsetup

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Setup für AR-basierte Soll/Ist-Vergleiche mit einem Lasertrackingsystem besteht wie in Abbildung 5-17 dargestellt aus einem mobilen AR-Wagen sowie dem Lasertracker T3 der Fa. API. Der Lasertracker ist ein bewährtes Messwerkzeug in der Bauplanung, welches sich durch hohe Reichweite, hinreichende Genauigkeit und eine Vielzahl von Registrierungs- und Messfunktionen für die Baustelle auszeichnet. Er nutzt Interferometer und Winkelgeber am Laserkopf, um so über Entfernung und Richtung die exakte Position eines Trackingtargets im Raum zu bestimmen. Die Verwendung eines Trackingtargets mit integrierter Sensorik ermöglicht das Messen der Orientierung des Targets selbst, wodurch alle sechs Freiheitsgrade bekannt werden. Beim eingesetzten Target handelt es sich um den Smart Track Sensor (STS) der Fa. API. Eine Adapterplatte verbindet ihn fest mit der Kamera (siehe Bildvergrößerung in Abbildung 5-17).

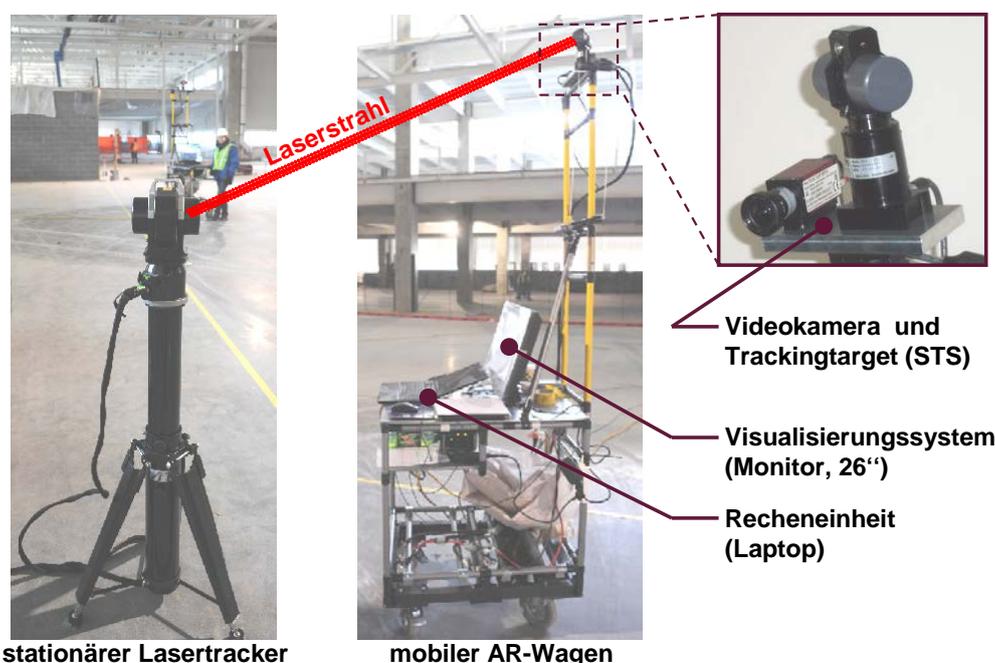


Abbildung 5-17: AR-Systemsetup mit Lasertracker; rechts: Kamera und Trackingtarget (STS) (eigener Entwurf)

Auf dem AR-Wagen sind alle weiteren zum AR-System gehörenden Komponenten installiert. Dazu gehört ein CAD-Laptop zur Berechnung der Trackingdaten, zur Datenhaltung und zur Generierung der überlagerten AR-Szenen. Die verwendete AR-Software ist der Unifeye Planner der Fa. Metaio. Zur Aufnahme der Umgebung wird eine digitale Industriekamera mit einer Auflösung von 1920 x 1080 Pixel und einem 6,5 mm Objektiv mit fester Brennweite eingesetzt. Sie ist an einem erhöhten Ausleger der mobilen AR-Einheit montiert. Die Visualisierung der AR-Szene erfolgt monitorbasiert auf einem 26-Zoll Flachbildschirm. Als Eingabegeräte werden Tastatur und Maus genutzt.

Die Kommunikation zwischen Lasertracker und STS erfolgt kabellos per W-LAN. Die Arbeitsentfernung wird durch die Reichweite des Lasertrackers zum STS limitiert. Damit ergibt sich ein Arbeitsraum von 40 Metern um den Tracker herum, in dem der mobile Wagen frei bewegt werden kann. Die gesamte Energieversorgung ist mit vier handelsüblichen Autobatterien und einem Spannungswandler möglich, was das System von einer Stromversorgung auf der Baustelle unabhängig macht.

### 5.3.3 Systemkalibrierung

Zur Kalibrierung der intrinsischen Kameraparameter werden mit der Kamera mehrere Bilder eines bekannten Referenzpunktmusters erzeugt, wobei der Bildbereich möglichst formatfüllend mit dem Kalibrierfeld abzudecken ist [God02]. Die Fa. AICON bietet hierfür Kalibrierplatten mit hochgenau vermessenen Referenzpunkten an. Ein qualitativ hochwertiges Kalibrierergebnis ist nur mit scharf fokussierten Referenzpunkten des Kalibrierfeldes möglich.

Im vorliegenden Anwendungsfall wirkt sich die geringe Größe verfügbarer Kalibrierplatten nachteilig auf das Kalibrierergebnis aus. Da die Kalibrierplatten selten größer als einen Quadratmeter sind und möglichst formatfüllend aufgenommen werden müssen, erfolgt die Kalibrierung im nahen Fokusbereich der Kamera. Eine besondere Herausforderung in dem beschriebenen Szenario ist jedoch der relativ große Arbeitsraum innerhalb einer Fabrikhalle. Eine im Nahbereich kalibrierte Kamera liefert bei der Betrachtung entfernter Objekte unscharfe Bilder (vgl. Abbildung 5-18).

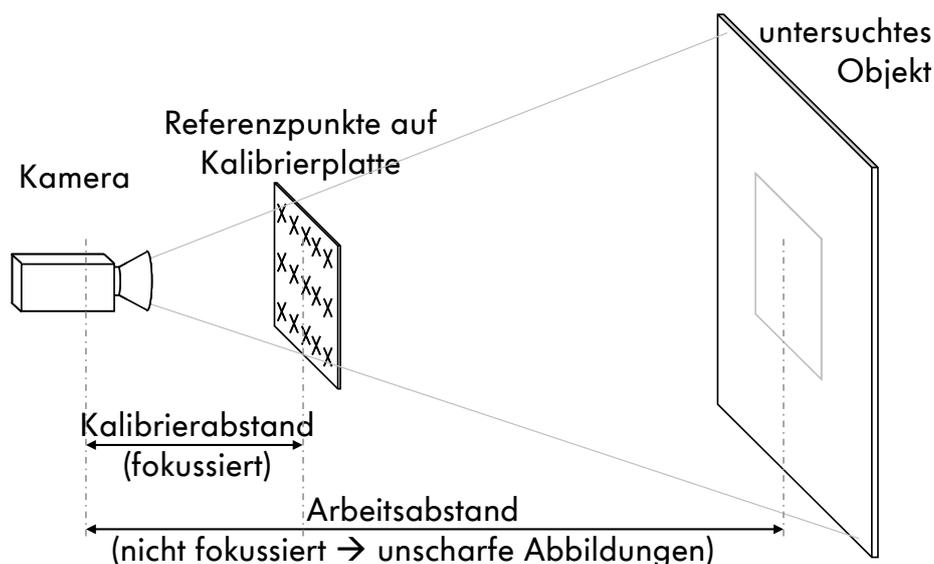


Abbildung 5-18: Unterschied zwischen Kalibrier- und Arbeitsabstand [eigener Entwurf]

Als Folge ergeben sich AR- Szenen mit unscharfem Realbildanteil und scharf gerendertem virtuellen Bildanteil. Neben dem verringerten Immersionsgefühl lassen sich Abweichungen zwischen Realität und Virtualität nur schlecht erkennen. Dieses Unschärfenproblem lässt sich durch ein größeres Kalibrierfeld lösen, welches auch in der Arbeitsentfernung formatfüllend aufgenommen werden kann [SM04].

Für die notwendige Target-Kamera-Kalibrierung wird ebenfalls ein geeignetes Feld aus Referenzobjekten benötigt (vgl. Kapitel 4.3.3.2). Vor diesem Hintergrund ist es im Rahmen dieser Arbeit sinnvoll ein Referenz- bzw. Kalibrierfeld aufzubauen, das sowohl zur Kalibrierung der internen Kameraparameter als auch zur Target-Kamera-Kalibrierung geeignet ist. Zur Kalibrierung des Gesamtsystems wird ein formatfüllendes Referenzfeld erzeugt, das sowohl vom Lasertracker als auch von der Kamera angetastet werden kann. Ein solches Kalibrierfeld kann aus Laserreflektoradaptern, so genannten Nestern (vgl. Abbildung 5-19, oben), aufgebaut werden, welche fest montiert werden und die Position der einzelnen Referenzpunkte des Kalibrierfeldes definieren.

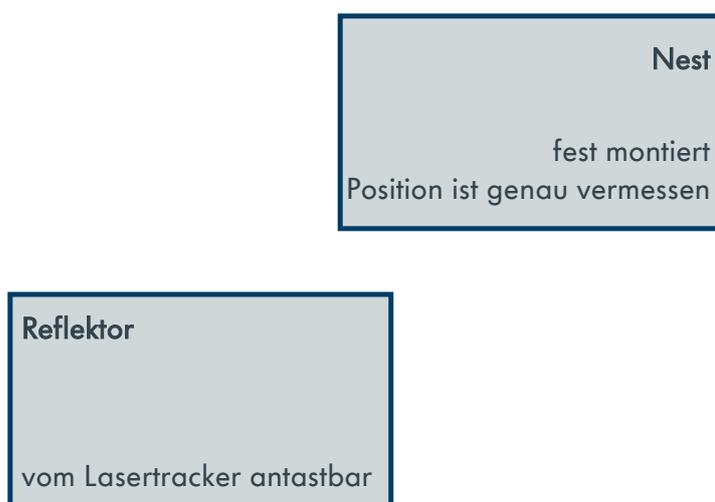


Abbildung 5-19: Aufbau der Referenzpunkte des Kalibrierfeldes [eigener Entwurf]

Der jeweilige Referenzpunkt befindet sich im Zentrum des sphärischen Lasertrackerreflektortargets (vgl. Abbildung 5-19, links) und wird nach der Montage des Nests vermessen. Zum Antasten der Referenzpunkte mit dem Kamerasystem werden die Nester mit photogrammetrischen Marken ausgerüstet (vgl. Abbildung 5-19, rechts), die im Kamerabild getrackt werden. Die mechanische Verbindung der photogrammetrischen Marken ist als präzise gefertigtes Kugelsegment ausgeführt, das exakt den Abmessungen des Lasertrackerreflektortargets entspricht. So referenzieren die Photogrammetriemarker auf die gleichen Referenzpunkte des Kalibrierfeldes. Mit zwölf Nestern wird ein formatfüllendes Kalibrierfeld in der benötigten Arbeitsentfernung aufgebaut.

Abbildung 5-20 zeigt als Ergebnis ein Kalibrierfeld mit (rechts) und ohne Photogrammetrieadapter (links). Das Kalibrierfeld kann sowohl vom Trackingsystem als auch vom Kamerasystem in Arbeitsentfernung formatfüllend angetastet werden.

Feld aus Nestern



Feld aus Nestern mit AICON-Targeten



Abbildung 5-20: Kalibrierfeld ohne (links) und mit Photogrammetrieadaptern (rechts) [eigene Aufnahmen]

Zur Kalibrierung wird zunächst die Position des Lasertrackers zum Kalibrierfeld registriert. Anschließend werden die STS-Koordinaten getrackt und per UDP-Stream dem AR-System zur Verfügung gestellt. Danach werden Fotos des Kalibrierfeldes mit Photogrammetriemarken erstellt und zeitsynchron die Position des STS-Trackingtargets für jedes Bild aufgezeichnet. Abbildung 5-21 zeigt das Prinzip des anschließenden Kalibrierprozesses zum Bestimmen der Transformation zwischen Kamera und STS-Trackingtarget ( $T_{TK}$ ).

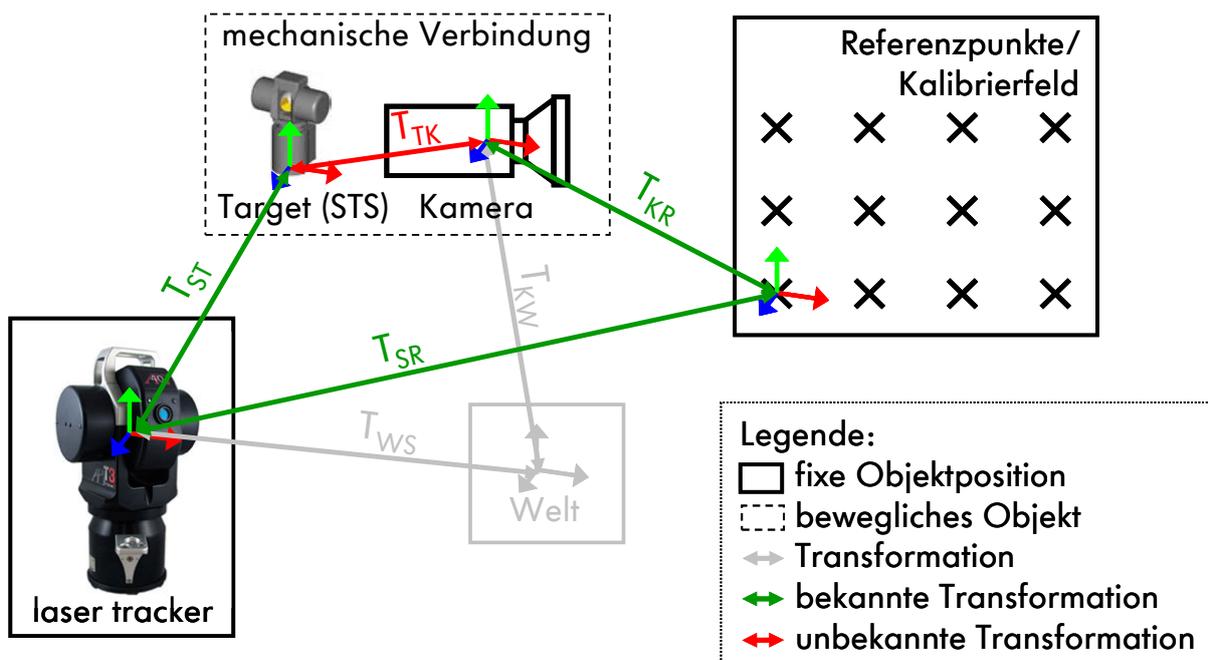


Abbildung 5-21: gesuchte Transformation bei der Sensor - Kamera - Kalibrierung [eigener Entwurf]

Das Registrieren des Lasertrackers zum Kalibrierfeld ( $T_{SR}$ ) erfolgt durch das Vermessen der Nester mit einem Reflektortarget. Mit den Referenzpunktpositionen lassen sich aus den Fotos des mit photogrammetrischen Marken bestückten Referenzfeldes sowohl die intrinsischen Kameraparameter (vgl. Abschnitt 4.3.3.1) als auch die externe Kameraorientierung ( $T_{KR}$ ) berechnen. Zeitsynchron zum Fotografieren wird die Position des STS-Trackingtargets ( $T_{ST}$ ) für jedes Bild aufgezeichnet. Mit Kenntnis der Transformationen  $T_{SR}$ ,  $T_{KR}$ , und  $T_{ST}$  wird das Bestimmen der Transformation zwischen Kamera und Trackingtarget ( $T_{TK}$ ) für jedes Bild möglich. Mit einer Ausgleichsrechnung über die ermittelten Transformationswerte aller Bilder, ergibt sich die gesuchte Transformation wie folgt ( $n$  = Anzahl der aufgenommenen Bilder):

$$T_{TK} = \sum_{k=1}^n \frac{T_{KR_k} \times (T_{SR} \times T_{ST_k})}{n} \quad (5.3)$$

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Prozess ermöglicht die Kalibrierung der optischen Kameraparameter und der Sensor-Kamera-Transformation in einem Arbeitsgang. Zusätzlich wird der Handlungsbedarf nach einer im Fernbereich kalibrierten Kamera abgedeckt.

### 5.3.4 Registrierungsprozess

Ist die Systemkalibrierung abgeschlossen, kann der Registrierungsprozess auf das Einmessen des Lasertrackers in das Arbeitskoordinatensystem reduziert werden. Hierzu wird der Lasertracker zunächst an eine strategisch günstige Position am zu untersuchenden Bereich platziert. Die Position des Lasertrackers ist so zu wählen, dass der mobile Wagen alle gewünschten Aufnahmepositionen anfahren kann, ohne die Sichtverbindung zum Lasertracker zu unterbrechen.

Für das Einmessen des Lasertrackers in das Hallensystem existieren mehrere bewährte Lösungen. So können beispielsweise frei wählbare Geometriepunkte abgenommen und durch Best-Fit-Verfahren an einem vorhandenen Geometriemodell ausgerichtet werden. Ein genaueres Ergebnis wird mit der Verwendung von dedizierten Messpunkten erreicht. Sofern in der Halle Messpunkte vorhanden sind können diese wie in Abbildung 4-6 (Seite 76) dargestellt direkt vermessen werden. Im Anschluss erfolgt die Transformation des im Lasertrackerkoordinatensystem vermessenen Punktfeldes in das Hallensystem, wobei der Ursprung des Lasertrackerkoordinatensystems ebenfalls in Hallenkoordinaten transformiert wird. Abbildung 5-22 zeigt in einen Screenshot aus der Messsoftware Spatial Analyzer das Einmessen eines Lasertrackersystems in das Referenzpunktfeld einer Fabrikhalle.

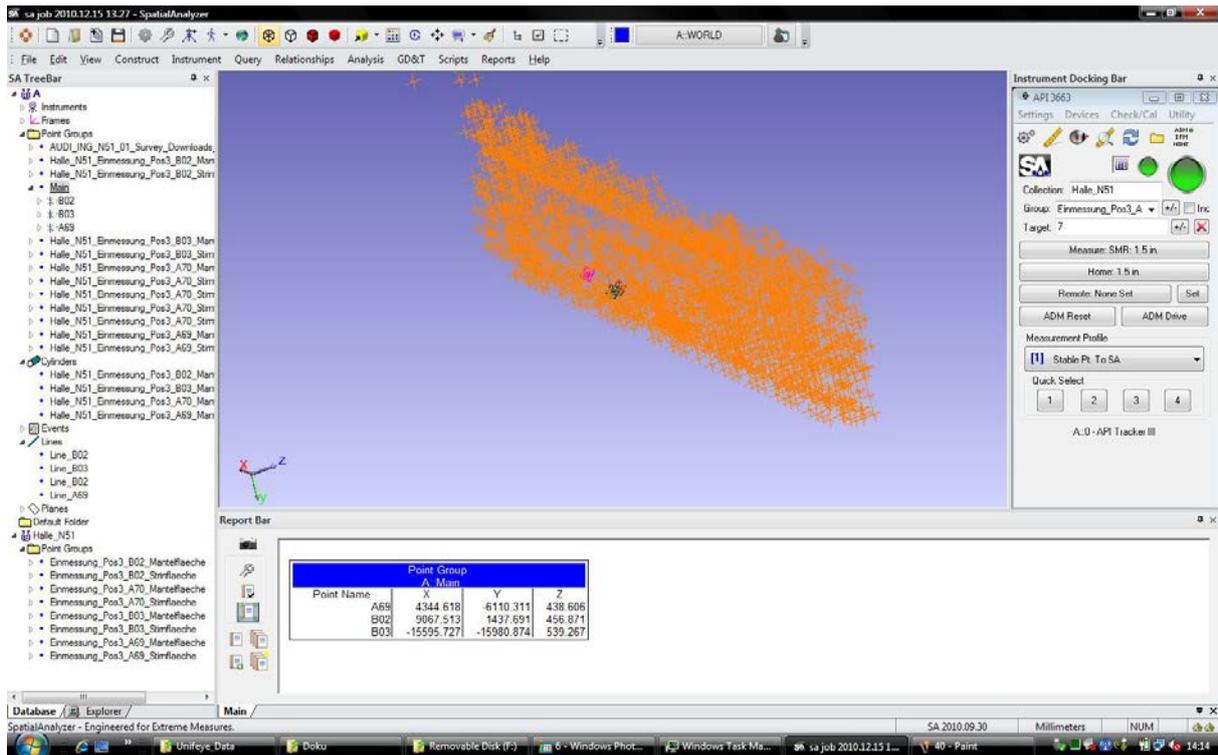


Abbildung 5-22: Einmessen des Lasertrackers in des Referenzpunktfeld einer Produktionshalle mit der Software Spatial Analyzer [eigene Aufnahme]

Die Darstellung in Abbildung 5-22 ist exemplarisch und zeigt im mittig positionierten Renderbereich die Messpunkte einer Fabrikhalle als orangene Koordinatenkreuze. Die Baumstruktur im linken Bildschirmbereich ermöglicht die Navigation durch Messpunkte und Geometrieobjekte, während das rechts dargestellte Menü die Messfunktionen des Lasertrackers visualisiert. Das Antasten von realen Messpunkten erfolgt durch Lasertrackerreflektortargets (wie zum Beispiel in Abbildung 5-19 dargestellt). Für das Einmessen des Lasertrackers sind mindestens drei Referenzpunkte in der Fabrikhalle zu vermessen und auf das Messpunktfeld zu referenzieren. Mit mehr als drei Punkten erfolgt eine Überbestimmung, wodurch eine Aussage zur Güte der Registrierung möglich ist.

Nach der Registrierung des Lasertrackers im Hallensystem wird die Laserverbindung zum STS am mobilen AR-Wagen hergestellt. Die Messsoftware trackt nun die Pose des STS in Hallenkoordinaten und stellt sie der AR-Software bereit. Mit dem Laden der Target-Kamerakalibrierung, die als Trackingkonfiguration vorliegt, der Kamerakalibrierungsdatei und der Konfiguration des Lasertrackers als Trackingsystem ist der Registrierungsprozess für Unifeye abgeschlossen. Innerhalb des Trackingvolumens kann der mobile AR-Wagen frei bewegt werden, solange die direkte Sichtlinie zwischen Lasertracker und STS bestehen bleibt. Bei Unterbrechung der Sichtverbindung wird der STS neu anvisiert; ein erneutes Einmessen ist nicht notwendig. Bei günstigen Sichtverhältnissen kann so eine komplette Fertigungslinie mit

nur einer Lasertrackerregistrierung durchgeführt werden. Andernfalls ist der Lasertracker umzusetzen und neu einzumessen. Ein Einmessvorgang in einer Fabrikhalle dauert je nach Eimesstrategie 15 bis 30 Minuten. Abbildung 5-23 stellt den im Rahmen der Arbeit entwickelten Registrierungsprozess dar.

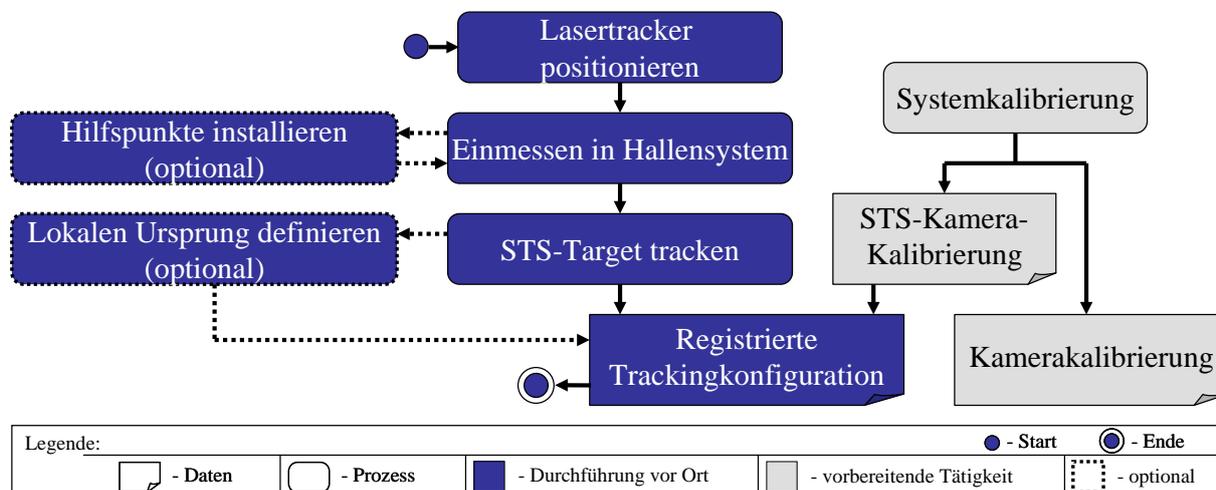


Abbildung 5-23: Prozessschritte zur Registrierung mit Lasertracker

Abbildung 5-23 verdeutlicht den relativ geringen Vor-Ort-Aufwand bei der Registrierung des entwickelten Systems. Wird die Systemkalibrierung im Vorfeld durchgeführt, reduziert sich der Registrierungsprozess unter günstigen Voraussetzungen auf das Einmessen des Lasertrackers. Optional kann es nötig sein zusätzliche Hilfspunkte (Passpunkte) zu installieren oder den Ursprung eines weit entfernten Modellkoordinatensystems zu transformieren.

Ist das Referenzpunktfeld einer Halle nicht dicht genug, um den Lasertracker von den gewünschten Positionen einzumessen, können zusätzliche Hilfspunkte ergänzt werden. Hierzu wird die benötigte Anzahl von Reflektoraufnahmen (Nestern) montiert, vermessen und dem Referenzpunktfeld als zusätzliche Passpunkte hinzugefügt.

Die mitunter großen Entfernungen der Modellkoordinatensysteme von Hallenmodellen führen bei der AR-Überlagerung in Videobildern „springenden“ Modellen. Dieses Phänomen ist in der Literatur als Jittering bekannt und wird durch kleine Mess- bzw. Trackingungenauigkeiten verursacht, die sich aufgrund des langen Hebels in deutlich sichtbaren Positionsabweichungen der virtuellen Modelle zeigen. Das Jittering-Problem kann durch die Definition eines lokalen Arbeitskoordinatensystem nahe der Lasertrackerposition gelöst werden. In diesem Fall ist die Transformation vom Weltkoordinatensystem zum lokalen Arbeitskoordinatensystem zu bestimmen und den zu überlagernden Modellen oder der Trackingkonfiguration invertiert hinzuzuaddieren. Der Hebeleffekt von kleinen Messabweichungen wird dadurch eliminiert.

Der aufgezeigte Registrierungsprozess wurde im Rahmen dieser Arbeit in mehreren Pilotprojekten erfolgreich getestet. Im Folgenden wird die Einmessung über das Geometriemodell einer Halle an einem ausgewählten Projekt beschrieben.

### 5.3.5 Evaluierung im Pilotprojekt

Der erste Einsatz des Augmented Reality Systems mit Large-Area-Tracking erfolgte beim Hallenneubau am Standort der Volkswagen AG in Chattanooga (TN) in den USA. Dabei stand die Überprüfung der Hallen- und Gebäudestrukturen im Mittelpunkt. Konkret bedeutete das die Abnahme der drei Produktionshallen für Karosseriebau, Montage und Versuchsbau auf dem rund 5,6 Quadratkilometer großen Fabrikgelände.



Abbildung 5-24: Foto der Karosseriebauhalle zum Untersuchungszeitpunkt [eigene Aufnahme]

Zum Zeitpunkt der Untersuchung waren die Hallen wetterfest aufgebaut und es wurde mit der Installation der Versorgungstechnik begonnen (siehe Abbildung 5-24). Für die Pilotuntersuchung wurden die Karosseriebauhalle, die Montagehalle und die Pilothalle ausgewählt.

#### 5.3.5.1 Vorbereitung

Durch die Entfernung des Einsatzortes und den damit verbundenen Reiseaufwand war eine Vorortbesichtigung nicht wirtschaftlich. Die Planung des Fabrikprojektes wurde jedoch vollständig mit den Werkzeugen der Digitalen Fabrik des Volkswagenkonzerns umgesetzt. So existiert ein virtuelles Gesamtmodell, das im Rahmen des Fabrik-DMU Prozesses erstellt wurde [AHKB10]. Auf Basis dieses Modells wurde im Vorfeld eine virtuelle Begehung der Fabrik durchgeführt und die abzugleichenden Arbeitsumfänge abgestimmt.

Die vorbereitende Kalibrierung des AR-Systems war im Zusammenhang mit dem langen Transportweg nicht möglich. Bei einem Interkontinentaltransport kann die Langzeitstabilität der Kalibrierwerte nicht sichergestellt werden. Die Kalibrierung sollte daher am Einsatzort durchgeführt werden.

### **Datenbeschaffung**

Als Output des Fabrik-DMU standen die 3D-Modelle für Gebäudestruktur und technische Gebäudeausstattung direkt für den AR-Einsatz zur Verfügung. So lagen für jede Halle separate JT-Dateien zu Gebäudestruktur, Stahlbau, Sprinklertechnik, Lüftung, Dachtragwerk, Versorgungsleitungen, Elektrik und Teilen der Fördertechnik vor. Insgesamt waren 69 JT-Dateien mit der Realität abzugleichen. Diese entsprechen einem Datenvolumen von ca. 540 MB mit 2,08 Milliarden Polygonen und bilden etwa 70.000 Quadratmeter Hallenfläche ab.

### **Systemkalibrierung**

Zur Kalibrierung wurde am Einsatzort ein Referenzpunktfeld aus Lasertrackingnestern und AICON-Kreismarken installiert (vgl. Abbildung 5-25).

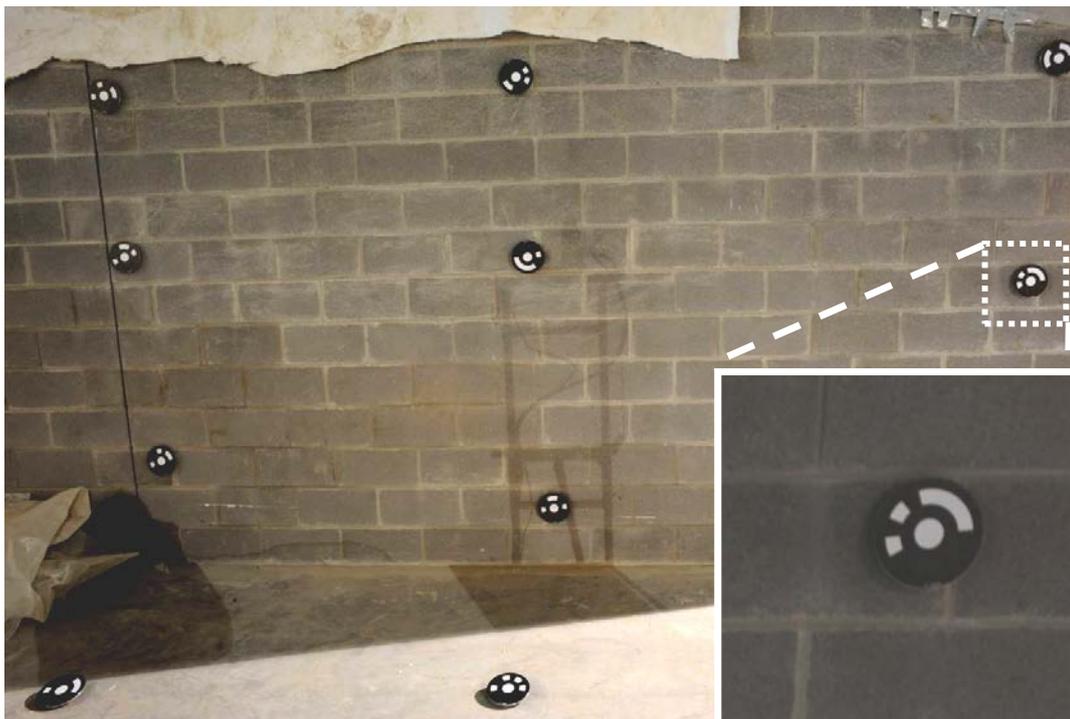


Abbildung 5-25: Kalibrierfeld mit AICON-Targets auf der Baustelle [eigene Aufnahme]

Nach dem Vermessen des Referenzpunktfeldes wurde der Kalibrierprozess wie in Abschnitt 5.3.3 beschrieben durchlaufen. Als Messsystem kam die Software Spatial Analyzer der Fa. New River Kinematics zum Einsatz. Abbildung 5-26 zeigt in einem Sequenzdiagramm die genutzten Softwaresysteme und den Informationsfluss bis zum Abschluss der Kalibrierung.

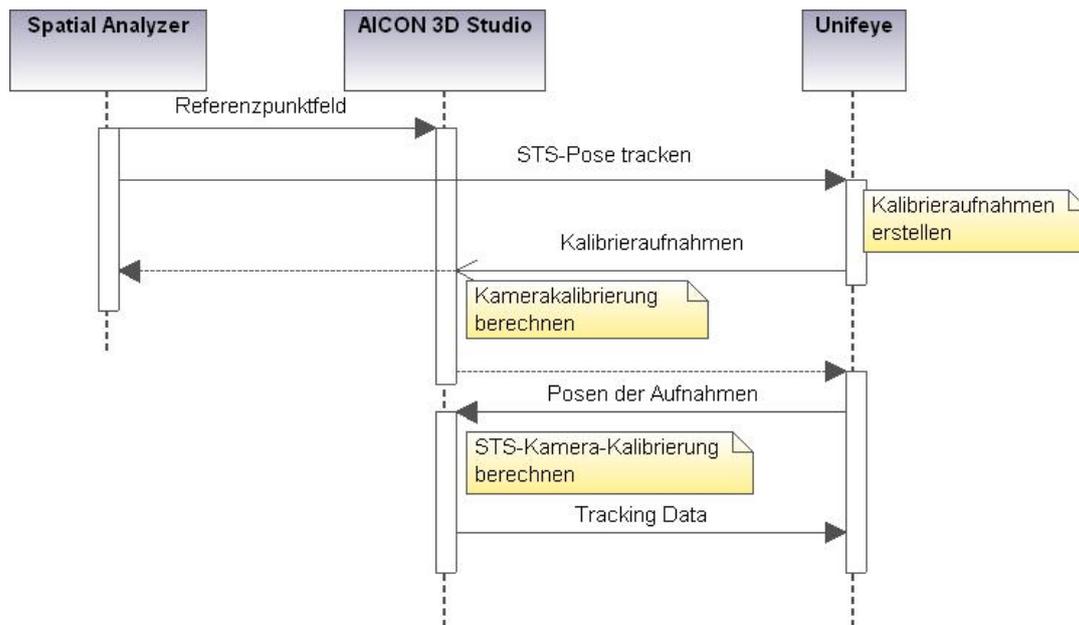


Abbildung 5-26: Sequenzdiagramm der Systemkalibrierung [eigener Entwurf]

Nach dem Vermessen wurden die Koordinaten der Referenzfeldpunkte in das Photogrammetriesystem Aicon3D-Studio exportiert. Während die Pose des STS getrackt wurde, erstellte der Anwender mit der Pose-Snapshot-Funktion in Unifeye Aufnahmen des Kalibrierfeldes. In Verbindung mit den bekannten Referenzpunktkoordinaten wurden mit Aicon3D-Studio die internen Kameraparameter sowie die externe Kameraorientierung für jedes Foto berechnet. Im Anschluss berechnete das Zusatzmodul „Eye-in-Hand-Calibration“ in Aicon3D-Studio aus der externen Kameraorientierung und der STS-Poseninformationen die Transformation zwischen STS- und Kammerkoordinatensystem. Die Transformation wurde in Form einer XML-Datei als Trackingkonfiguration für Unifeye abgelegt. Als Kalibrierergebnisse lagen die Trackingdatei und die Kamerakalibrierungsinformation zur direkten Verwendung in Unifeye vor.

### 5.3.5.2 Durchführung

Das Untersuchen mehrerer Hallen erforderte ein strukturiertes Vorgehen mit zahlreichen Einmessvorgängen. Zu Beginn wurde jede Halle in Sektoren eingeteilt, wobei das bekannte Hallenraster als Orientierung diente. Die Sektorengöße betrug beim Hallenraster des genannten Szenarios 40m x 80 Meter. Der Lasertracker wurde in der Mitte eines Sektors positioniert (siehe Abbildung 5-28) und an den Flächen von Hallensäulen und -boden in das Hallenkoordinatensystem eingemessen. Die gemessenen Punkte wurden nach dem 3-2-1-Prinzip über einen Best-Fit-Algorithmus zum CAD-Modell der Hallengeometrie registriert. Dieser Registrierungsvorgang dauerte je Sektor ca. 20 Minuten und war für jeden Sektor zu wiederholen.

Nach erfolgter Registrierung standen Trackinginformationen zur Verfügung, die in Kombination mit den erfassten Bilddaten, den Kalibrierinformationen und 3D-Modellen das Zusammenstellen einer AR-Szene in der Unifeye ermöglichten. Die AR-Szene wurde mit beiden möglichen Strategien der Offline- und Onlineauswertung (vgl. Kapitel 4.3) untersucht. Abbildung 5-27 verdeutlicht das Vorgehen mit beiden Strategien im pilotierten Szenario.

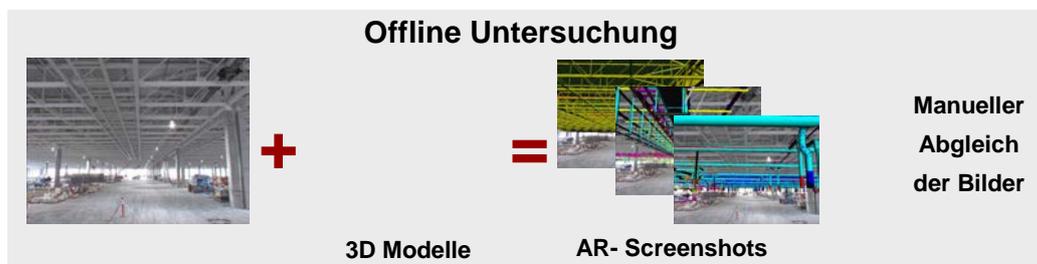


Abbildung 5-27: Fotobasierte Offline-Untersuchung (oben) und Online-Auswertung (unten) [eigener Entwurf]

### Offline-Auswertung

Das Erstellen der Aufnahmen für eine spätere Überlagerung erfolgte ohne Kenntnis über das Vorhandensein virtueller Geometrie im betrachteten Bildausschnitt. Um unter diesen Bedingungen möglichst dennoch alle notwendigen Bildinformationen zu erfassen, war ein strukturiertes Vorgehen notwendig. Daher wurde der mobile AR-Wagen in jedem Sektor nach gleichem Schema an definierten Standpunkten positioniert und ausgerichtet. Das Aufnahmeschema für einen Sektor aus zwei Hallenrasterfeldern ist in Abbildung 5-28 dokumentiert.

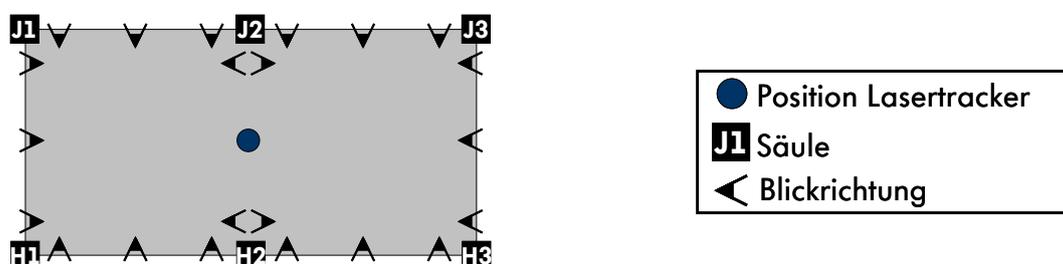


Abbildung 5-28: Aufnahmepositionen innerhalb eines Sektors im Hallenraster [eigener Entwurf]

Für jeden Standpunkt wurden die drei Blickrichtungen „Boden“, „Horizont“ und „Decke“ fotografiert. Die Reihenfolge und Nummerierung der generierten Aufnahmen wurde protokolliert.

In der Karosseriebauhalle wurden so insgesamt 1.022 orientierte Aufnahmen für eine Fläche von 31.680 m<sup>2</sup> erzeugt, während zur Erfassung der Fläche von 39.186 m<sup>2</sup> aus Montage- und Pilothe 1.526 bzw. 184 Aufnahmen erstellt wurden. Nach dem Erstellen der orientierten Aufnahmen wurden diese mit 3D-Modellen der verschiedenen Planungsbereiche zur AR-Ansicht überlagert. Eine Überlagerung des Gesamtmodells der Fabrikhalle (ca. 2 Milliarden Polygone) konnte mit dem Renderer des Systemprototyps nicht realisiert werden. Daher erfolgte die Überlagerung für jedes Foto mit mehreren Teilmodellen wodurch zahlreiche AR-Ansichten erzeugt wurden. Mit 59306 AR-Screenshots wurde ein Vielfaches der ursprünglichen Bildanzahl generiert. Aufgrund der großen Bild- und Teilmodellanzahl erfolgte das Erzeugen der AR-Screenshots automatisiert. Tabelle 5-4 zeigt eine Übersicht der erstellten AR-Bilder für jede untersuchte Fabrikhalle.

Tabelle 5-4: orientierte Aufnahmen, 3D-Modelle und AR-Ansichten je Fabrikhalle

Fabrikhalle	# Fotos	# 3D-Modelle	# AR-Bilder
Karosseriebau	1022	18	18396
Montage	1526	25	38150
Pilothe	184	15	2760
Gesamt	2732	58	59306

Die Auswertung der AR-Bilder wurde manuell durchgeführt und war sehr zeitintensiv. Wie bei der Datenaufnahme empfiehlt sich ein nach Sektoren strukturiertes Vorgehen. Erkannte Abweichungen wurden als annotierte Screenshots dokumentiert (vgl. Abbildung 5-30).

### Online-Auswertung

Im Rahmen der Live-Begehung ermöglichte die mobile AR-Einheit freies Bewegen innerhalb des registrierten Hallensektors. 3D-Modelle wurden in Echtzeit überlagert und wie in Abbildung 5-29 dargestellt auf einem 26-Zoll Monitor für mehrere Nutzer visualisiert.



Abbildung 5-29: Planer und Architekt bei Online-Auswertung auf der Baustelle [eigene Aufnahmen]

Alle Fachbereiche waren unmittelbar am Auswerteprozess beteiligt und konnten Lösungen für erkannte Probleme oder Bauabweichungen direkt auf der Baustelle diskutieren. Das System bot somit eine gute Diskussions- und Abstimmungsplattform für alle beteiligten Fachbereiche. Die Kommunikation auf der Baustelle wurde deutlich verbessert. Darüber hinaus reduzierte sich die Dokumentation erkannter Abweichungen auf wenige aussagekräftige Screenshots.

### 5.3.5.3 Ergebnis

Mit dem entwickelten System konnte insgesamt eine große Übereinstimmung zwischen Bauzustand und Konstruktionsdaten festgestellt werden. Insbesondere die Gebäudestruktur war wie geplant aufgebaut. Die installierten Umfänge der Fördertechnik stimmten ebenfalls mit der Planung überein. Da zum Zeitpunkt der Untersuchung nur Teile der Fördertechnik und noch keine Produktionsanlagen in den Hallen installiert waren, konnten diese nicht abgeglichen werden. Jedoch wies die Installation der technischen Gebäudeausstattung einige mehr oder weniger gravierende Abweichungen zur 3D-Planung auf. In Summe existieren hierfür 68 dokumentierte Beispiele. Auffällig oft wurde festgestellt, dass Regenleitungen nicht wie geplant installiert verlaufen. Abbildung 5-30 zeigt dies am Beispiel einer potenziellen Kollision in der Karosseriebauhalle. Die installierte Regenleitung hatte einen Versatz von ca. 1,5 Meter zum geplanten Verlauf. Die Folge war eine Überschneidung der installierten Leitung mit dem geplanten Verlauf der Lüftungstechnik (rechts im Bild).

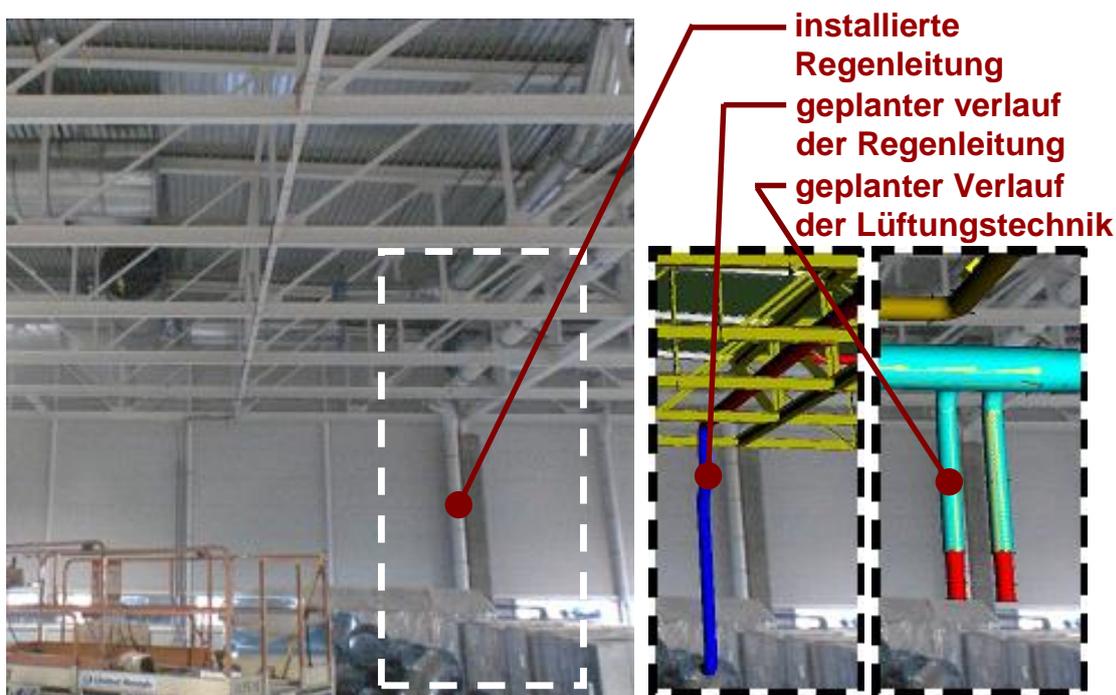


Abbildung 5-30: Kollision einer versetzten Regenleitung mit geplantem Verlauf der Lüftung [eigener Entwurf]

Alle erkannten Abweichungen wurden in eine der vier Kategorien „Fehl-IST“, „Fehl-Soll“, „Gestaltabweichung“ und „Positionsabweichung“ eingeteilt. Fehl-IST bzw. Fehl-SOLL bedeuten, dass entweder ein 3D-Modell oder ein reales Objekt vorhanden ist, zu dem kein entsprechendes Pendant existiert. Die Kategorien „Gestaltabweichung“ und „Positionsabweichung“ beschreiben Situationen, bei denen zwar ein virtuelles Modell zu einem korrespondierendem realen Objekt auf der Baustelle existiert, sich jedoch in seiner geometrischen Ausführung davon unterscheidet oder falsch positioniert ist. Tabelle 5-5 gibt einen Überblick der erkannten Abweichungen und ihrer Kategorie für jede Produktionshalle. Ohne das im Rahmen der Arbeit durchgeführte Pilotprojekt, wären diese Abweichungen erst später erkannt worden und hätten höhere Kosten verursacht.

Tabelle 5-5: Kategorisierung der erkannten Abweichungen

Fabrikhalle	Fehl-SOLL	Fehl-IST	Gestaltabweichung	Positionsabweichung
Karosseriebau	5	-	6	16
Montage	12	3	3	13
Pilothalle	3	-	2	5

Unter allen Abweichungen waren Positionierungsfehler mit einer Häufigkeit von 50 % am stärksten vertreten. 29,41 % der gefundenen Unstimmigkeiten ließen sich auf fehlende Modelle in den Planungsdaten zurückführen. Dabei handelte es sich zumeist um sehr kleine Objekte wie Rohrleitungen mit einem Durchmesser von weniger als 2/3 Zoll. Nach den im Projekt geltenden Lastenheften war deren Modellierung nicht vorgeschrieben.

20,59 % der gefunden Fehler gehen auf Gestaltabweichungen zurück. Meist betrifft dies Elemente der Medienversorgung wie z.B. Lüftungstechnik. In der Kategorie fehlender realer Objekte ließen sich nur wenige belastbare Beispiele aufzeigen, da es in der Natur des Baustellen-szenarios liegt, dass zahlreiche Objekte noch nicht installiert waren. Lediglich ein Dachdurchbruch und zwei Lüftungsschächte, welche im aktuellen Bauzustand der Montagehalle bereits vorhanden sein sollten, konnten tatsächlich als fehlende Elemente identifiziert werden.

Im Ergebnis der Bauabnahme wurde festgestellt, dass die für die Anlagenplanung zugrunde gelegten Gebäudeinformationen in allen relevanten Punkten mit den vorgeschriebenen Prämissen übereinstimmten. Durch frühzeitiges Erkennen von Änderungsbedarf innerhalb der Gebäudeinfrastruktur hat der Systemeinsatz die termingerechte Fertigstellung der Fabrik abgesichert.

### **5.3.5.4 Fazit**

Im Rahmen des Pilotprojektes wurden das entwickelte System und der Registrierungsprozess erprobt. Ein Soll/Ist-Vergleich war in einem großen Untersuchungsbereich - in diesem konkreten Fall in Form einer Bauabnahme - erfolgreich möglich. Weiterhin konnte eine Verbesserung der Kommunikation und Zusammenarbeit auf der Baustelle erreicht werden.

Die Ergebnisse des Praxiseinsatzes bestätigen das Potenzial der AR-Technologie als Werkzeug für den Abgleich digitaler Planungsdaten mit der Realität. Es ist anzumerken, dass der manuelle Aufwand bei der Offline-Auswertung sehr arbeitsintensiv ist. Wie bei der fotobasierten Lösung mit Markeradaptern zeigt sich auch hier der Bedarf nach Werkzeugen zur automatisierten Auswertung von AR-Szenarien. Für zukünftige Projekte wird daher die Anwendung des Online-Auswerteprozesses empfohlen. Ein Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Möglichkeit, das Bauprojekt während der Realisierung zu begleiten und so bereits das Entstehen von Abweichungen zu vermeiden.

## **5.4 Zusammenfassung**

Das Anwendungsszenario und die eingesetzte Trackingtechnologie bestimmen maßgeblich welche Objekte bzw. Koordinatensysteme im Rahmen des AR-Registrierungsprozesses zueinander in Beziehung zu setzen sind. Die Definition eines allgemeingültigen Registrierungsprozesses ist somit nicht möglich. Für die geplante Prozessverbesserung wurden daher mit Hilfe anwendungsspezifischer Bewertungskriterien geeignete Trackingtechnologien ausgewählt. Optisches Markertracking und auch der Einsatz eines Koordinatenmessgerätes in Form eines Lasertrackers wurden als Technologien mit großem Potenzial für industrielle Soll/Ist-Vergleiche im Karosseriebau erkannt. Für beide Trackingtechnologien wurden AR-Systemkonfigurationen realisiert und Registrierungsprozesse entwickelt. In beiden Fällen war die Entwicklung eines individuellen Kalibrierprozesses ausschlaggebend für eine erfolgreiche und präzise Systemregistrierung. In zwei Pilotprojekten wurden die entwickelten Systeme und Registrierungsprozesse evaluiert. Beide Systeme konnten mit vertretbarem Aufwand erfolgreich und reproduzierbar im Anwendungsumfeld registriert werden. Die Verbesserung des Registrierungsprozesses wurde damit erreicht.

Im Ergebnis der Pilotprojekte bestätigt sich jedoch auch der weitere Handlungsbedarf (vgl. Kapitel 4.4.1). So ist das Auswerten von AR-Szenen und das Identifizieren von Abweichungen weiterhin ein arbeitsintensiver manueller Prozess. Hier wäre eine automatisierte oder

zumindest teilautomatisierte Auswertung wünschenswert. Weiterhin ist nicht verifiziert in welchem Umfang vorhandene Abweichungen erkannt werden. Es ist nicht sichergestellt, dass Anwender - auch bei großer Sorgfalt - alle Abweichungen identifizieren können.

So sollen im folgenden Kapitel insbesondere Fragestellungen nach optimaler Datenaufnahme, erkennbaren Abweichungen und der Tauglichkeit von Analyse- bzw. Auswertefunktionen eingehender untersucht werden.



## 6 Untersuchungen zur Datenaufnahme und -auswertung

Zur Verbesserung der Teilprozesse Datenaufnahme und Auswertung soll untersucht werden, wie sich der Erfassungsprozess und die verwendeten Auswertefunktionen auf das Ergebnis von Soll/Ist-Vergleichen auswirken. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob die AR-Technologie zur Identifikation von Abweichungen besser geeignet ist als herkömmliche Methoden.

Sowohl die Untersuchungen zum Potenzial der AR-Technologie als auch zu den Teilprozessen Datenaufnahme und -auswertung sind mit einer Datenerhebung im Rahmen einer Probandenstudie möglich [DGB08]. In diesem Kapitel wird die Erarbeitung und Durchführung einer entsprechenden Studie beschrieben, die Antworten auf folgende Fragestellungen gibt:

1. Lassen sich Abweichungen durch AR effizienter identifizieren als mit anderen Technologien? Welche Arten von Abweichungen (vgl. Kapitel 4.2) lassen sich mit welcher Technologie mehr oder weniger gut erkennen lassen?
2. Wirkt sich die zur Verfügung gestellte Methode auf die Motivation bzw. das Befinden der Anwender aus? Wenn ja ist zu klären, welche Methode von den Anwendern am besten akzeptiert wird.
3. Wie wirkt sich die Erfahrung im Umgang mit dem Vergleichswerkzeug auf das Ergebnis des Soll/Ist-Vergleichs aus? In diesem Zusammenhang soll insbesondere im Bezug zur AR analysiert werden, ob bei technologisch unerfahrenen Anwendern Lerneffekte während der Untersuchung auftreten. Daraus lassen sich Erkenntnisse für einen möglichen Transfer in den produktiven Einsatz ableiten.

Weiterhin werden folgende AR-spezifischen Fragestellungen untersucht:

4. Wie groß ist das durchschnittliche Datenvolumen (z. B. die Anzahl von Fotos), das bei einem Soll/Ist-Vergleich aufgezeichnet wird? Existieren dabei Unterschiede zwischen erfahrenen und unerfahrenen Anwendern?
5. Gibt es Abhängigkeiten zwischen der Anzahl der aufgenommenen Daten und der Anzahl der erkannten Abweichungen?
6. Welche der zur Verfügung stehenden Analysefunktionen des AR-Systems werden für die Identifikation von Abweichungen tatsächlich eingesetzt?

### **6.1 Aufbau der Probandenstudie**

Aufgabe der Probanden ist es, mit einer vorgegebenen Untersuchungsmethode einen Soll/Ist-Vergleich durchzuführen. Ziel ist es, Abweichungen zwischen einem realen Objekt und den korrespondierenden Konstruktionsdaten zu erkennen. Dabei werden Messdaten erhoben, deren Auswertung Rückschlüsse auf Antworten zu den zuvor genannten Fragen ermöglicht.

#### **6.1.1 Probandengruppen und Methodik**

Die Probanden werden in drei Versuchsgruppen unterteilt. Gruppe eins führt den Versuch mit dem Vergleichshilfsmittel technische 2D-Zeichnung durch. Gruppe zwei kann zusätzlich zu den technischen 2D-Zeichnungen ein 3D Modell zum Abgleich nutzen. Die dritte Gruppe nutzt das markerbasierte AR-System mit den in Kapitel 5.2 beschriebenen Vorrichtung adaptern. Die Bearbeitung der Versuchsaufgabe soll mit allen Hilfsmitteln zu bewältigen sein. Die Aufbaugröße bewegt sich daher im Vorrichtungsmaßstab und nicht im Large-Area-Bereich. In den Gruppen wird zwischen Probanden unterschieden, die Erfahrungen im Umgang mit dem Vergleichswerkzeug haben bzw. keine Vorkenntnisse besitzen.

##### **6.1.1.1 Gruppe 1: 2D – technische Zeichnungen**

Gruppe eins nutzt zum Soll/Ist-Vergleich nur einfache Messwerkzeuge (Lineal und Messschieber) sowie technische Zeichnungen im Format DIN A3. Diese umfassen eine Zusammenbauzeichnung der Vorrichtung, eine Stückliste mit allen Teilmodellen sowie jeweils eine DIN A3 Zeichnung der Teilmodelle und die zugehörige Stückliste.

##### **6.1.1.2 Gruppe 2: 3D – CAD Tool**

Der Probandengruppe zwei wird neben den oben genannten Werkzeugen ein Desktop-PC, auf welchem das Modell der Referenzvorrichtung im CAD-System CATIA V5 visualisiert wird, zur Verfügung gestellt.

##### **6.1.1.3 Gruppe 3: Augmented Reality**

Den Probanden der Gruppe drei steht das in Kapitel 5.2 vorgestellte AR-System auf einem Desktop-PC mit der digitalen Fotokamera Nikon D200 zur Verfügung. Die AR-Software Unifeye bietet den Probanden zehn Analysefunktionen an, um die die AR-Szene auszuwerten. Tabelle 6-1 listet diese Analysefunktionen auf und liefert jeweils eine kurze Beschreibung.

Tabelle 6-1: Analysefunktionen des AR-Systems

Funktion	Beschreibung
1. Geometrie ein- und ausblenden	Einzelne virtuelle Objekte können in der AR-Szene sichtbar oder unsichtbar gesetzt werden.
2. Schnittebenen	Schnittebenen können im Szenario frei erzeugt und positioniert werden. Sie trimmen virtuelle Geometrie.
3. Verschiebung (Translation/Rotation)	Virtuelle Objekte können in der AR-Szene beliebig positioniert werden.
4. VR-Modus	Freie Navigation im VR-Szenario ohne Bildbezug
5. Ansicht in verschiedenen Fotos	Ermöglicht es die AR-Szene in verschiedenen Fotos und somit aus unterschiedlichen Perspektiven zu betrachten.
6. Zoom	In Abhängigkeit von der Auflösung des Fotos kann der Nutzer die Darstellung der AR-Szene vergrößern.
7. Verdeckungsgeometrie	Virtuelle Objekte verdecken räumlich weiter hinten befindliche Objekte und bleiben dabei selbst ausgeblendet.
8. Kantendarstellung	Darstellung virtueller Objekte als Kantenmodell
9. Transparenz	Virtuelle Objekte lassen sich stufenlos transparent schalten, so dass dahinter liegende Bildelemente sichtbar sind.
10. Objektvermessung	Ermöglicht die Vermessung des Abstandes zweier beliebiger Punkte von virtuellen Objekten.

### 6.1.2 Versuchsaufbau

Um die Ergebnisse aller Gruppen vergleichbar zu machen, ist das Versuchsszenario für alle Probanden identisch. In einer Werkhalle wird eine Versuchsumgebung aufgebaut, welche dem industriellen Einsatzszenario der Anlagenumplanung einer Karosseriebauvorrichtung in der Automobilindustrie ähnelt (Abbildung 6-1).

Auf einer Fläche von 7,5m \* 5m sind eine Karosseriebauvorrichtung, ein Schreibtischarbeitsplatz für die Versuchsbetreuung und ein Schreibtischarbeitsplatz für die Probanden angeordnet. Auf dem Schreibtischarbeitsplatz der Probanden werden je nach Probandengruppe die entsprechenden Hilfsmittel und Werkzeuge wie Messinstrumente, Kamera, PC und Software zur Verfügung gestellt.



Abbildung 6-1: Versuchsaufbau schematisch (links) und real, aus Perspektive eines AR-Probanden (rechts)

Bei der zu untersuchenden Vorrichtung handelt es sich um eine Spannvorrichtung aus dem Karosseriebau. Die Abmessungen (B/L/H) betragen 1,5m x 2,2m x 1,1m. Die Vorrichtung besteht im Wesentlichen aus einer Grundplatte auf Rädern, 20 Aufbauelementen (Zentrier- vorrichtungen und Spanner) sowie Elementen zur Medienversorgung (Pneumatikschläuche, Ventilbatterien und Kabelkanäle).

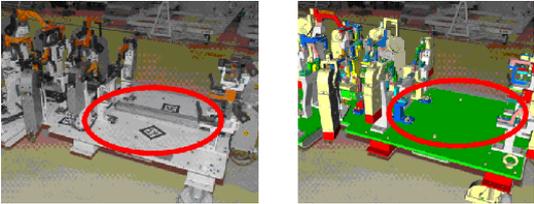
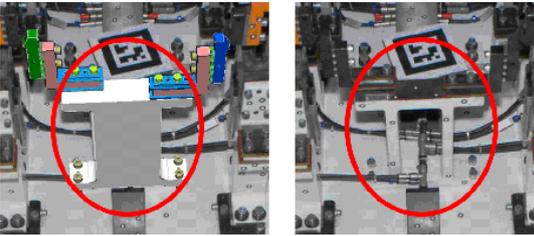
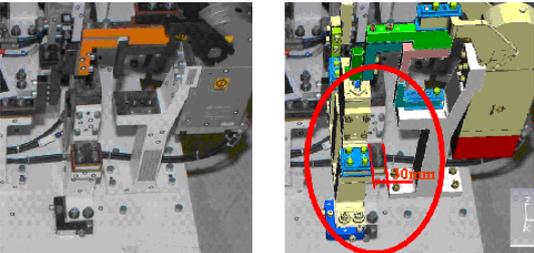
Für den AR-Versuch werden an der Vorrichtung und in unmittelbarer Umgebung insgesamt zwölf optische Marker montiert. Die Positionen werden so gewählt, dass es für die Probanden möglich ist, für jede beliebige Perspektive beim Fotografieren mindestens einen Marker abzubilden.

Um für alle Probanden gleiche Versuchsbedingungen zu schaffen, werden die Markerpositionen während der gesamten Studie nicht verändert. Die für den Soll/Ist-Vergleich notwendige Registrierung des AR-Systems im Vorrichtungskoordinatensystem sowie die Kalibrierung der Versuchskamera sind nicht Bestandteil des Probandenversuches. Diese Prozessschritte werden im Vorfeld eines Versuchs durch die Versuchsbetreuung durchgeführt.

### 6.1.3 Abweichungen

Zwischen der realen Vorrichtung und den Konstruktionsdaten werden bewusst 39 Abweichungen erzeugt, die vier unterschiedlichen Kategorien zugeordnet werden. Tabelle 6-2 gibt eine Übersicht über Art und Anzahl der Abweichungen zwischen der Referenzvorrichtung und den Konstruktionsdaten. Für jede Kategorie ist ein erklärendes Beispiel abgebildet.

Tabelle 6-2: Abweichungen zwischen Referenzvorrichtung und Konstruktionsdaten

Kategorie und Beispiel	Beschreibung	Anzahl
<p>Kategorie 1: Fehl-IST</p> 	<p>Ein Teil, das in den Konstruktionsdaten (SOLL) vorhanden ist, fehlt auf der realen Referenzvorrichtung (IST).</p>	<p>12</p>
<p>Kategorie 2: Fehl-SOLL</p> 	<p>Ein Teil, das auf der realen Referenzvorrichtung (IST) vorhanden ist, fehlt in den Konstruktionsdaten (SOLL).</p>	<p>6</p>
<p>Kategorie 3: Geometrieabweichung</p> 	<p>Ein Teil ist sowohl in den Konstruktionsdaten als auch auf der realen Vorrichtung vorhanden, jedoch anders ausgeführt (z.B. rund statt eckig).</p>	<p>16</p>
<p>Kategorie 4: Positionsabweichung</p> 	<p>Ein Teil befindet sich auf der realen Vorrichtung an einer anderen Position als in der Konstruktion vorgesehen.</p>	<p>5</p>

Alle Abweichungen sind dokumentiert und werden durch eine ID eindeutig identifiziert. Im Anhang der Arbeit findet sich eine detaillierte Auflistung aller Abweichung an der Versuchsvorrichtung (s. Anhang A.3). Es wird festgelegt, dass Positionsabweichungen mindestens einen Versatz von 20 Millimetern aufweisen. Das reduziert das Risiko von Fehlerkennungen.

### 6.2 Datenerhebung

Im Folgenden werden sowohl die aufgezeichneten Messdaten, sowie die Methoden zu ihrer Erhebung erläutert. Ein Teilumfang der Daten kann objektiv durch diskrete Messung bestimmt werden. Die subjektive Beurteilung des Eigenzustands unterliegt jedoch immer einer persönlichen Wertung.

#### 6.2.1 Parameter und Messdaten

Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse eines Probandenversuchs setzt voraus, dass alle Probanden ein möglichst identisches Szenario erleben. Daher werden neben identischem Untersuchungsobjekt auch die Parameter Versuchsdauer und Versuchszeit vereinheitlicht. Ein Versuch dauert von Beginn der Datenaufnahmen bis zum Ende zwei Stunden. Zur Versuchsdurchführung stehen pro Arbeitstag zwei Zeitfenster zu Verfügung. Das erste von 09:00 bis 11:00 Uhr und das zweite von 13:00 bis 15.00 Uhr. In jeder Gruppe wird der Versuch von der gleichen Anzahl Probanden am Vormittag und am Nachmittag durchgeführt.

Die Messdaten werden während des Versuchs handschriftlich in Fragebögen und Messprotokollen erfasst. Zu Beginn werden allgemeine Informationen zum Probanden, zur Vorerfahrung (Anhang A.4) sowie zum momentanen Befinden erfasst (Anhang A.5). Am Versuchsende wird die Abfrage zum persönlichen Befinden wiederholt und in einem abschließenden Feedbackfragebogen die Selbsteinschätzung der Probanden und Anmerkungen zum Hilfsmittel aufgezeichnet (Anhang A.6).

Während des Versuchs dokumentieren die Probanden jede identifizierte Abweichung in einem Untersuchungsprotokoll (Anhang A.7). Neben einer laufenden Nummer und einer prägnanten Beschreibung ist der Abweichung eine Kategorie (vgl. Tabelle 6-2) zuzuordnen. Im Fall einer Positionsabweichung sind die Probanden angehalten die Abweichung zu quantifizieren.

Parallel zu den Probanden führt die Versuchsbetreuung ein Beobachtungsprotokoll (Anhang A.8). Darin wird der Zeitpunkt jeder Identifikation dokumentiert. Zusätzlich werden allgemeine Beobachtungen zum Verhalten und zur Untersuchungsstrategie vermerkt. Bei Probanden der Gruppe drei dokumentiert die Versuchsbetreuung zusätzlich Daten zur Beantwortung der AR-spezifischen Fragestellungen. Dazu gehören die zur Identifikation einer Abweichung genutzten Analysefunktionen, Fotografier- und Auswertzeit, Anzahl der Fotografierdurchgänge und die Anzahl der erstellten Aufnahmen.

Der Feedbackfragebogen (Anhang A.6) wird von allen Probanden ausgefüllt. Auf einer Skala von 1 (trifft nicht zu) bis 5 (voll zutreffend) wird abgefragt, inwieweit die Probanden den folgenden Aussagen zustimmen.

- Ich habe das Gefühl alle Abweichungen gefunden zu haben.
- Die zur Verfügung stehende Zeit war ausreichend.
- Das Hilfsmittel hat mich gut bei meiner Aufgabe unterstützt.
- Die Benutzung des Hilfsmittels ist intuitiv.
- Ich hätte gerne andere Hilfsmittel benutzt, um die Aufgabe zu lösen.

### 6.2.2 Erfassen von Befinden und Motivation

Die Produktivierung neuer Technologien und Prozesse erfordert die Akzeptanz zukünftiger Anwender. Daher wird im Rahmen dieser Probandenstudie die Akzeptanz der AR-Technologie im Vergleich zu den alternativen Vergleichsmethoden untersucht. Die Motivationslage der Probanden soll dabei einen Rückschluss auf potentielle Akzeptanzprobleme geben. Ein bewährtes Verfahren zum Erfassen von individuellem Befinden und Motivationslage ist die Eigenzustandsskala (EZ-Skala) nach Nitsch. Diese Methode wurde bereits erfolgreich bei der Durchführung von AR-Probandenstudien eingesetzt [Tüm09].

Die EZ-Skala ist ein Verfahren zur hierarchisch-mehrdimensionalen Skalierung des aktuellen Befindens einer Person [Nit76]. Die EZ-Skala ermöglicht die Bewertung der situationsgebundenen Beanspruchungs-, Motivations- und Stimmungslage einer Person als Ausdruck ihres augenblicklichen Gesamtbefindens – von Nitsch als „Eigenzustand“ bezeichnet. Diese wird als bedeutsam für die Handlungsregulation aufgefasst. Situationsbedingte Befindlichkeitsänderungen signalisieren jeweils Änderungen der Anforderungsstruktur in Abhängigkeit von personenspezifischen Verarbeitungsprozessen [TRM+08].

Die Eigenzustandsskala enthält 40 Adjektive, die bezüglich ihres Zutreffens auf den momentanen Zustand des Probanden auf einer Ordinalskala von 1 (trifft kaum zu) bis 6 (trifft völlig zu) zu bewerten sind (Anhang A.5). Es handelt sich um eine hierarchische Faktorenanalyse (eine Hierarchie von insgesamt 14 Binärfaktoren), die den Eigenzustand analysiert, verstanden als erlebnismäßig repräsentierte aktuelle Handlungslage einer Person. Dabei wird zwischen den beiden Faktorengruppen Motivation und Beanspruchung unterschieden. Bei der Auswertung werden die Ränge der Adjektive zunächst durch flächentransformierte  $z'$ -Werte

ersetzt, die zu einem Binärfaktor gehörenden z'-Werte dann aufsummiert und diese Summenwerte anschließend nach der Stanine-Transformation in die Werte 1 bis 9 überführt. Die Interpretation der erhaltenen Staninewerte erfolgt auf der Grundlage einer dreistufigen Faktorenhierarchie, die in Abbildung 6-2 schematisch dargestellt ist.

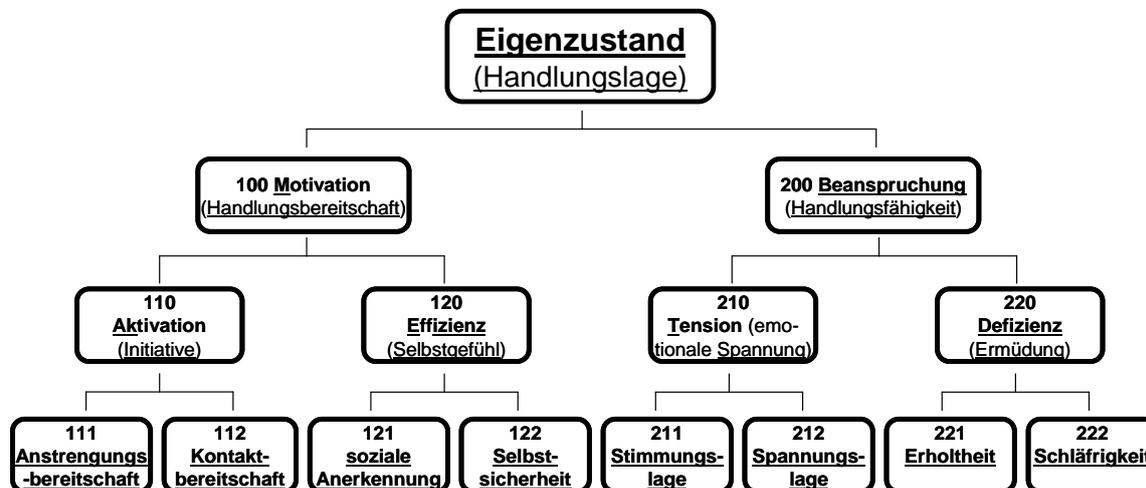


Abbildung 6-2: Faktorenhierarchie der EZ-Skala (nach [Nit76])

Dabei werden die Aussagen von der ersten, allgemeinen zur dritten, speziellen Ebene immer detaillierter. Hohe Staninewerte für die einzelnen Faktoren bedeuten, dass die Probanden ihr gegenwärtiges Gesamtbefinden – und damit ihre Handlungslage – positiv einschätzen. Es muss allerdings beachtet werden, dass es sich bei den Faktoren 200 (Handlungsfähigkeit), 220 (Ermüdung), 221 (Erholtheit), 222 (Schläfrigkeit) und 212 (Spannungslage) um so genannte „umgepolte“ Faktoren handelt. Für die Interpretation bedeutet dieser Sachverhalt, dass durch hohe Werte das genaue Gegenteil beschrieben wird; so signalisiert beispielsweise ein Stanine-Wert von 8 beim Binärfaktor 212 ein hohes Maß an Entspannung. Dieses standardisierte Testverfahren benötigt eine Bearbeitungszeit von ca. 10 Minuten.

### 6.2.3 Statistik

Der Datenumfang aus der Untersuchung zum Eigenzustand erfordert eine detaillierte Aufarbeitung. Die statistische Auswertung erfolgt explorativ; die Testentscheidungen basieren auf einem Signifikanzniveau von 5%. Zur Darstellung der Ergebnisse werden Mittelwert und Standardabweichung ( $MW \pm SD$ ) verwendet. Die statistischen Berechnungen der erfassten Daten werden mittels SPSS 15.0 für Windows durchgeführt. Es werden nichtparametrische Tests (2-verbundene Stichproben: Wilcoxon; k-unabhängige Stichproben: Kruskal-Wallis-Test) angewandt. Die statistischen Unterschiede werden mit t ( $p < 0,1$ ) oder \* ( $p < 0,05$ ) bezeichnet. Für nicht signifikante Ergebnisse wird kein Zeichen verwendet.

### 6.3 Arbeitshypothesen

Die hier beschriebene Untersuchung hat zum Ziel, das in der Literatur oft propagierte Potenzial der Augmented Reality Technologie für Soll/Ist-Vergleiche zu analysieren. Dies beinhaltet die Fragestellung, wie viele der vorhandenen Abweichungen sich mit der Technologie tatsächlich identifizieren lassen und welche Arten von Abweichungen besonders gut oder schlecht zu erkennen sind. Weiterhin soll analysiert werden, wie viele Aufnahmen während eines Soll/Ist-Vergleichs durchschnittlich erzeugt werden und ob Abhängigkeiten zwischen der Anzahl der erstellten Aufnahmen und der Qualität des Vergleichsergebnisses existieren. Auf Basis von Erfahrungswissen aus Pilotprojekten werden die folgenden Arbeitshypothesen aufgestellt.

**H1:** *Probanden erkennen mit AR mehr Abweichungen als ohne AR.*

**H2:** *Alle Probanden empfinden die zur Verfügung stehende Zeit zu kurz.*

**H3:** *Es existieren signifikante Unterschiede beim Erkennen verschiedener Kategorien von Abweichungen mit den verschiedenen Technologien.*

**H4:** *Bei allen Technologien verschlechtert sich die Beanspruchungslage zum Versuchende.*

**H5:** *Die Beanspruchungslage verschlechtert sich bei der Probandengruppe mit der technischen Zeichnung am stärksten.*

Weiterhin sollen Augmented Reality spezifische Fragestellungen untersucht werden, zu denen folgende Hypothesen aufgestellt werden:

**H6:** *Probanden, die relativ wenige Aufnahmen erstellen, erkennen eine geringere Anzahl von Abweichungen als andere.*

Das verwendete AR-System bietet verschiedene Analysefunktionen (vgl. Tabelle 6-2). Es ist anzunehmen, dass sich einige Funktionen bei der Erkennung von Abweichungen als effektiver erweisen als andere. Darüber hinaus werden Probanden, die bisher nur wenig mit der Software vertraut sind, eine gewisse Einarbeitungszeit in das System benötigen. Aus diesen Aussagen leiten sich die beiden folgenden Hypothesen ab.

**H7:** *Beim AR-basierten Soll/Ist-Vergleich werden nicht alle der angebotenen Analysewerkzeuge im gleichen Umfang genutzt.*

**H8:** *Der Umgang mit der AR-Technologie ist intuitiv möglich, sodass unerfahrene Probanden während des Versuchs lernen, die Funktionen des Systems effizient zu nutzen.*

## 6.4 Versuchsdurchführung

### 6.4.1 Probanden

Insgesamt nahmen 28 männliche und 7 weibliche Personen (Durchschnittsalter  $28,98 \pm 6,7$  Jahre) freiwillig an der Untersuchung teil. Die Probanden wurden in die drei Versuchsgruppen „2D - technische Zeichnung“, „3D - CAD Tool“ und „Augmented Reality“ unterteilt. Die Gruppen eins und zwei hatten jeweils eine Stärke von zehn Probanden. Da insbesondere AR-spezifische Fragestellungen analysiert wurden gehörten der dritten Gruppe 15 Probanden an.

### 6.4.2 Ablauf

Vor Beginn der Versuche wurden die Probanden über den Zweck der Studie informiert und erhielten eine Einführung in die Funktionen des zur Verfügung gestellten Hilfsmittels.

Ein Probandenversuch dauerte zwei Stunden. Die Probanden füllten anfangs zwei Fragebögen aus, die Informationen zu technischen Vorerfahrungen und zum momentanen Eigenzustand (vgl. Abschnitt 6.2.2) dokumentierten. Im Anschluss begann der Versuch in dem die Probanden mit den ihnen zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln die Vorrichtung im Detail untersuchen konnten. Die Probanden der Gruppe 1 (techn. Zeichnungen) verbrachten die meiste Zeit an der Vorrichtung und glichen die 2D-Pläne vor Ort mit dem realen Objekt ab. Probanden der zweiten Gruppe arbeiteten an der Referenzvorrichtung und verstärkt am PC-Arbeitsplatz, den Sie nur verließen, um Details an der Vorrichtung zu überprüfen. Probanden, die den AR-gestützten Vergleich durchführten begannen mit dem Fotografieren der Referenzvorrichtung, was sie während der Untersuchung ggf. wiederholten. Abbildung 6-3 zeigt schematisch den Versuchsablauf für AR-Probanden.



Abbildung 6-3: Schema AR-Versuchsablauf

Die Anzahl der Bilder sowie die gewünschten Perspektiven konnten vom Probanden frei gewählt werden. Danach wurden die Bilder von der Kamera auf den AR-PC übertragen und der Proband begann mit Hilfe der in Tabelle 6-1 beschriebenen Analysefunktionen nach Abweichungen der Konstruktionsdaten zu suchen.

Jede erkannte Abweichung wurde vom Probanden dokumentiert. Parallel dazu notierte die Versuchsbetreuung die aktuelle Uhrzeit sowie die Analysefunktionen, die zum Erkennen der Abweichung genutzt wurden, im Beobachtungsprotokoll.

Die Probanden konnten den Versuch vorzeitig beenden, sofern sie davon überzeugt waren, alle erkennbaren Abweichungen identifiziert zu haben. Andernfalls beendete die Versuchsbetreuung die Untersuchung 10 Minuten vor Ablauf der angesetzten Dauer von zwei Stunden. In der letzten Phase des Versuches füllten die Probanden zwei abschließende Fragebögen aus. Im ersten wurde der aktuelle Eigenzustand abgefragt. Im zweiten Fragebogen gaben die Probanden ein Feedback zum Versuch ab.

## 6.5 Ergebnisse

### 6.5.1 Erkannte Soll/Ist-Abweichungen

Unabhängig von der verwendeten Technologie werden bei einem Soll/Ist-Vergleich durchschnittlich 53,26% der Abweichungen durch die Probanden identifiziert. Abbildung 6-4 liefert einen Überblick über die verwendeten Technologien und die erkannten Abweichungen mit einer Aufteilung nach den Abweichungskategorien.

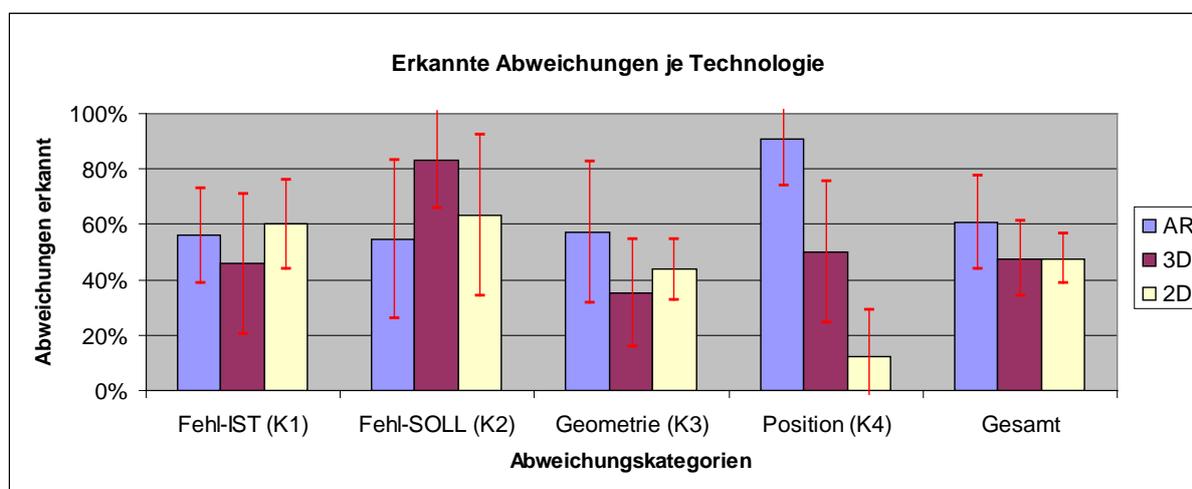


Abbildung 6-4: Anteile der erkannten Soll/Ist-Abweichungen nach Kategorie und Technologie

### 6.5.1.1 Kategorie 1 – Fehl-IST

Bei der Identifikation fehlender realer Objekte erreicht Gruppe eins (2D) das beste Ergebnis. Im Durchschnitt werden  $7,2 \pm 1,93$  von 12 Abweichungen ( $60\% \pm 16,1\%$ ) erkannt. Die Probanden der Gruppe drei (AR) erkennen durchschnittlich  $6,73 \pm 2,05$  Abweichungen ( $56,1\% \pm 17,1\%$ ). Gruppe zwei erzielt mit  $5,5 \pm 3,03$  ( $45,8\% \pm 25,2\%$ ) Abweichungen das schlechteste Ergebnis.

### 6.5.1.2 Kategorie 2 – Fehl-SOLL

Besonders gute Ergebnisse erreicht Probandengruppe zwei (3D CAD) bei der Identifikation von Abweichungen der Kategorie zwei (fehlende Konstruktionsdaten). Im Schnitt werden  $5 \pm 1,05$  ( $83,8\% \pm 17,6\%$ ) von sechs Abweichung erkannt.

Am schlechtesten werden Abweichungen dieser Kategorie durch die Gruppe der AR-Probanden erkannt ( $3,27 \pm 1,71$  von 6;  $54,4\%$ ). Die relative Standardabweichung ist mit  $\pm 28,5\%$  sehr groß, was vermuten lässt, dass diese Art von Abweichungen mit AR sehr schwierig zu identifizieren ist.

Es wird vermutet, dass die bei der AR-Überlagerung ausbleibende Veränderung im betreffenden Bildbereich als Ursache für die niedrige Erkennungsrate gesehen werden kann. Um die Ursache genau zu eruieren und Konzepte zur Steigerung der Erkennungsrate zu erarbeiten, sind weiterführende Untersuchungen zu dieser Fragestellung notwendig.

### 6.5.1.3 Kategorie 3 – Geometrieabweichung

Probanden der Gruppe drei (AR) erkennen im Schnitt  $9,13 \pm 4,05$  ( $57,1\% \pm 25,3\%$ ) von insgesamt 16 Geometrieabweichungen und damit 2,13 Abweichungen mehr als Gruppe eins (2D) und 3,53 mehr als Gruppe 2 (3D).

### 6.5.1.4 Kategorie 4 – Positionsabweichung

Positionsabweichungen werden von Probanden der Gruppe eins (2D) kaum erkannt  $0,6 \pm 0,84$  ( $12\% \pm 16,9\%$ ). Zwei von fünf Abweichungen dieser Kategorie werden von keinem der zehn 2D-Probanden identifiziert. Probanden der Gruppe zwei (3D) entdecken  $2,5 \pm 1,27$  ( $50\% \pm 25,4\%$ ) aller Positionsabweichungen. Die Erkennungsrate der AR-Probanden liegt mit  $4,53 \pm 0,83$  ( $90,7\% \pm 16,7\%$ ) deutlich über den Ergebnissen der beiden anderen Gruppen.

Die AR-Probanden bestimmen den Betrag von Positionsabweichungen mit einer Genauigkeit von durchschnittlich 0,7 mm. Probanden der Gruppe zwei (3D) erreichen hier eine Genauigkeit von 0,86 mm, während Gruppe eins (2D) eine durchschnittliche Genauigkeit von 5 mm erzielt.

### 6.5.1.5 Zusammenfassung

Probanden der Gruppe eins (2D) erkennen von insgesamt 39 Abweichungen minimal 13 (33,33%) und maximal 23 (58,98%). Im Durchschnitt erkennen die Probanden 47,69% ( $18,6 \pm 3,57$ ) aller 39 Abweichungen. Insgesamt bleiben 3 Abweichungen (einmal Kategorie 3 und zweimal Kategorie 4) unentdeckt.

Probanden der Gruppe zwei entdecken minimal 12 (30,77%) und maximal 28 (71,79%) aller Abweichungen. Der Durchschnitt liegt bei 47,69% ( $18,6 \pm 5,36$ ). Es bleibt eine Positionsabweichung (K4) unentdeckt.

Mit AR konnten minimal 14 (35,9%) und maximal 35 (89,75%) der 39 Abweichungen identifiziert werden. Im Durchschnitt erkennen die Probanden 60,7% ( $23,67 \pm 6,55$ ) aller Abweichungen. Insgesamt bleibt keine Abweichung unentdeckt.

Im Gesamtdurchschnitt zeigt sich, dass Augmented Reality am besten zur Identifikation von Abweichungen der Konstruktionsdaten geeignet ist, wodurch Hypothese **H1** bestätigt wird. Jedoch existieren erhebliche Unterschiede bei der Erkennung verschiedener Abweichungsarten. So schneidet AR bei der Erkennung fehlender CAD-Daten (Kategorie 2) am schlechtesten ab, wohingegen sich Positionierungsfehler mit AR am besten identifizieren lassen. Dies bestätigt die Arbeitshypothese **H3**.

### 6.5.2 Arbeitserfahrung und -strategie

In jeder Versuchsgruppe wurde zwischen Probanden unterschieden, die Erfahrungen im Umgang mit dem zur Verfügung stehenden Hilfsmittel hatten bzw. keine Vorkenntnisse aufweisen (siehe Tabelle 6-3).

Tabelle 6-3: technische Vorerfahrung

Gruppe	Erfahrene	Unerfahrene	Summe
2D	6	4	10
3D	5	5	10
AR	7	8	15

Während des Versuchs dokumentierte die Versuchsbetreuung die Vorgehensweise jedes Probanden beim Soll/Ist-Vergleich, um Strategien in der Handlungsweise der Probanden und deren Einfluss auf das Vergleichsergebnis zu erkennen.

### 6.5.2.1 2D – technische Zeichnung

Abbildung 6-5 vergleicht den Erkennungsgrad von Abweichungen bei Probanden die im Umgang mit technischen Zeichnungen erfahren bzw. unerfahrenen sind. Vier unerfahrene Probanden erkennen  $16,50 + 3,42$  (42%) von 39 Abweichungen, wohingegen sechs erfahrene Probanden  $20,67 + 2,50$  (53%) Abweichungen identifizieren. In Kategorie eins und drei erzielen erfahrene Probanden eine deutlich höhere Erkennungsrate (in K1:  $8,00 + 1,79$  gegen  $6,00 + 1,63$ ; in K3:  $7,50 + 1,87$  gegen  $6,25 + 1,50$ ). Die Abweichungen von Kategorie zwei und vier werden im gleichen Umfang erkannt.

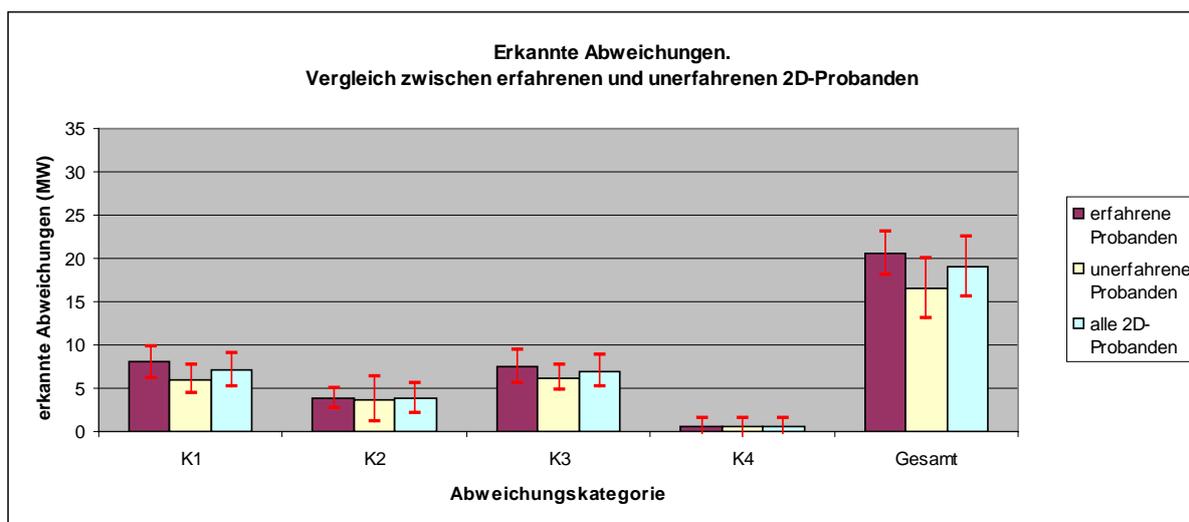


Abbildung 6-5: Erkannte Abweichungen, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen 2D-Probanden

In der Abbildung 6-6 wird die Versuchsdauer auf der X-Achse in 10-Minuten-Abschnitte unterteilt und auf der Y-Achse für jeden Abschnitt die Anzahl erkannter Abweichungen erfasst.

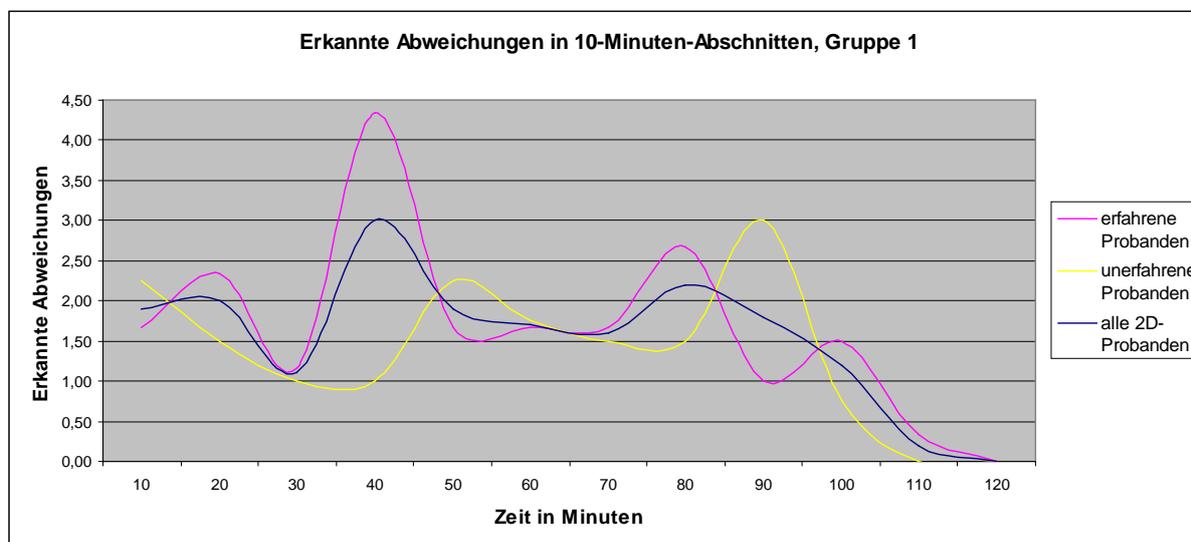


Abbildung 6-6: Erkannte Abweichungen über Zeit, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen 2D-Probanden

Bei unerfahrenen Probanden der Gruppe eins (2D) ist eine lange Einarbeitungszeit festzustellen. Nach 40 Minuten ist ein Anstieg auf durchschnittlich 2,25 Erkennungen je 10 Min. (bis 50 Min.) zu beobachten. Nach 90 Minuten lässt sich ein zweiter deutlicher Anstieg auf 3 je 10 Min. feststellen. Bei den erfahrenen Probanden steigt die Anzahl innerhalb der ersten 20 Minuten bis auf durchschnittlich 2,33 je 10 Min. woraufhin die Erkennungsrate leicht abnimmt. Im Zeitfenster von 30 bis 40 Minuten erreicht die Erkennungsrate mit 4,33 ihren Höhepunkt. Über den gesamten Versuchsablauf hinweg ist die Verteilung von Erkennungen sowohl bei erfahrenen als auch bei unerfahrenen Probanden schwankend.

Bei den Probanden der Gruppe eins können drei wesentliche Strategien bei der Vorgehensweise des Abgleichs beobachtet werden:

1. Die Probanden verwenden zum Abgleich die Zusammenbauzeichnung der gesamten Vorrichtung.
2. Die Probanden vergleichen alle vorhandenen Einzelteilzeichnungen mit den realen Baugruppen und orientieren sich dabei an der Stückliste der Vorrichtung.
3. Die Probanden vergleichen Einzelteilzeichnungen mit den realen Einzelteilen und orientierten sich dabei manuell (reihum) an den Baugruppen der Vorrichtung.

2D-Probanden, welche die erste Strategie verfolgen, finden insgesamt nur wenige Abweichungen, da sie die einzelnen Bauteile nicht im Detail untersuchen. Mit Strategie zwei und drei benötigen die Probanden mehr Zeit, um zu den Bauteilen passende Zeichnungen zu suchen. Sie erkennen größere Abweichungen, wie z.B. das Fehlen ganzer Baugruppen, nur schlecht. Eine Kombination der einzelnen Strategien wäre wünschenswert.

### **6.5.2.2 3D – CAD Tool**

Der Erkennungsgrad von Abweichungen bei erfahrenen und unerfahrenen 3D-Probanden wird in Abbildung 6-7 dargestellt. Fünf unerfahrene Probanden identifizieren insgesamt  $15,80 + 3,56$  (40,51%) Abweichungen. Fünf erfahrene Probanden erkennen  $21,40 + 5,68$  (54,87%) Abweichungen. Wie schon bei der Gruppe der 2D-Probanden erreichen erfahrene Probanden in Kategorie eins und drei ebenfalls eine deutlich höhere Erkennungsrate. Bei Kategorie zwei erzielen unerfahrene Probanden jedoch eine höhere Erkennungsrate (erfahrene:  $4,60 + 1,14$ , unerfahrene:  $5,40 + 0,89$ ). Kategorie vier wird von beiden Gruppen in etwa in gleicher Weise gut erkannt (erfahrene:  $2,40 + 1,52$ , unerfahrene:  $2,60 + 1,14$ ).

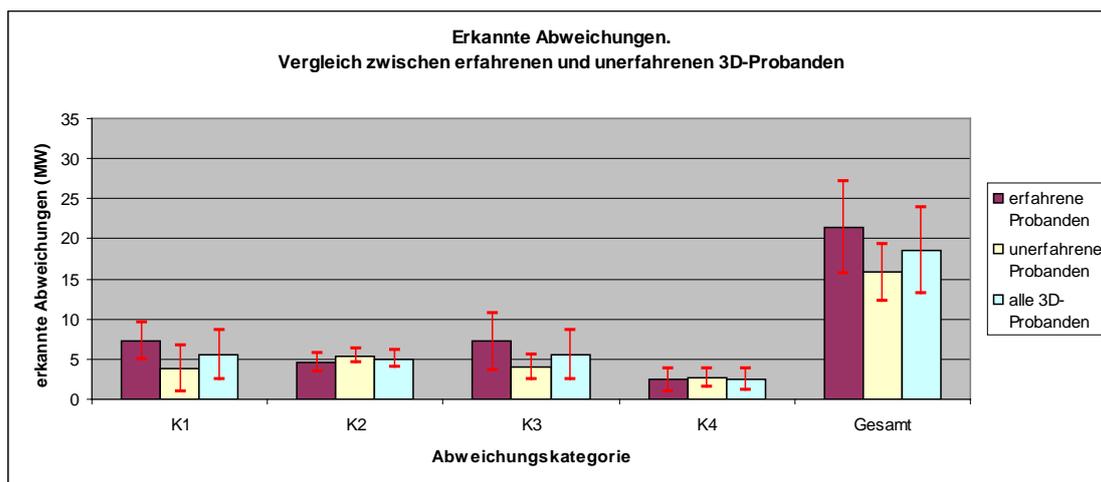


Abbildung 6-7: Erkannte Abweichungen, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen 3D-Probanden

Abbildung 6-8 zeigt die Lernkurven von unerfahrenen und erfahrenen 3D-Probanden. Bei unerfahrenen Probanden steigt die Anzahl erkannter Abweichungen nach 30 Minuten an. Bei den Erfahrenen steigt die Erkennungsrate innerhalb der ersten 30 Minuten bis auf 2,2 Stück, woran sich ein kurzer Einbruch und später Ansteigen anschließen. Insgesamt kann auch hier keine konstante Erkennungsrate abgeleitet werden.

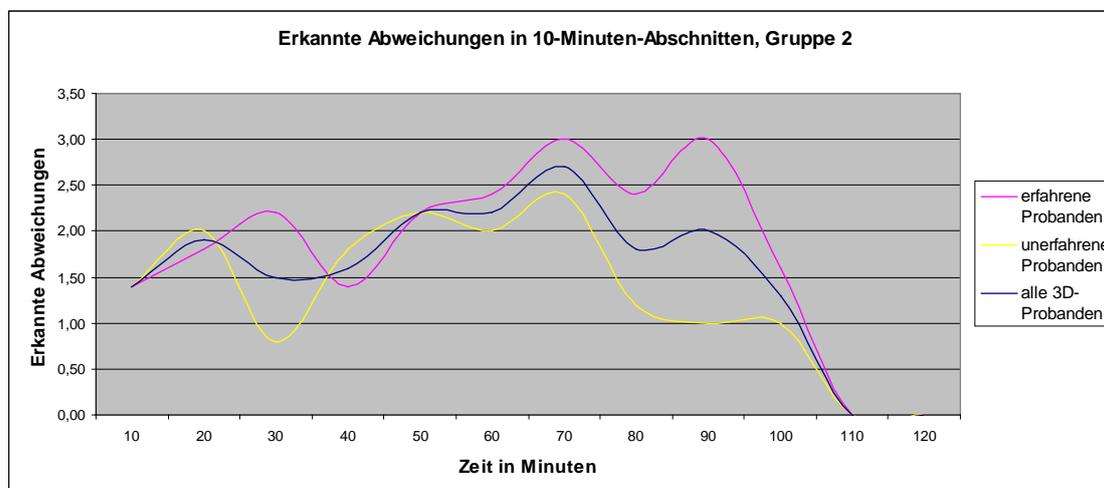


Abbildung 6-8: Erkannte Abweichungen über Zeit, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen 3D-Probanden

Bei der Auswertung werden die drei folgenden Strategien beobachtet:

1. Der Abgleich erfolgt weitgehend mit den technischen 2D-Zeichnungen; das CAD-Werkzeug Catia wird nur als Messwerkzeug benutzt.
2. Der Abgleich erfolgt größtenteils mit dem virtuellen Modell in Catia, während die technischen 2D-Zeichnungen lediglich ergänzen Charakter haben.
3. Die Probanden vernachlässigen die technischen Zeichnungen und arbeiten die meiste Zeit mit Catia, wobei sie nur wenig mit der Vorrichtung in Kontakt treten.

Einige Probanden aus Gruppe zwei arbeiten die meiste Zeit wie die 2D-Probanden nur mit der technischen Zeichnung, so dass sie die erste Strategie verfolgen und die CAD-Software nur als Messwerkzeug einsetzen. Manche Probanden nutzen die CAD-Software als Ergänzung zu den technischen Zeichnungen, wodurch Schwierigkeiten beim Lesen von Zeichnungen vermieden und Zeit gespart wird. Bei starker Fokussierung auf das CAD-Modell, lässt der physische Kontakt zur Vorrichtung nach, wodurch insbesondere Details weniger genau untersucht und viele kleinere Abweichungen übersehen werden.

### 6.5.2.3 Augmented Reality

Abbildung 6-9 vergleicht den Erkennungsgrad von Abweichungen bei erfahrenen und unerfahrenen AR-Probanden. Im Durchschnitt erkennen unerfahrene Probanden  $19,63 \pm 5,04$  (50,33%) und Erfahrene  $28,29 \pm 4,89$  (72,54%) von insgesamt 39 Abweichungen. Erfahrene Probanden erzielen in fast allen Kategorien eine deutlich höhere Erkennungsrate. Lediglich Positionsabweichungen (K4) werden von beiden Gruppen in ähnlicher Weise gut erkannt (erfahrene:  $4,57 \pm 0,53$ , unerfahrene:  $4,5 \pm 1,07$ ).

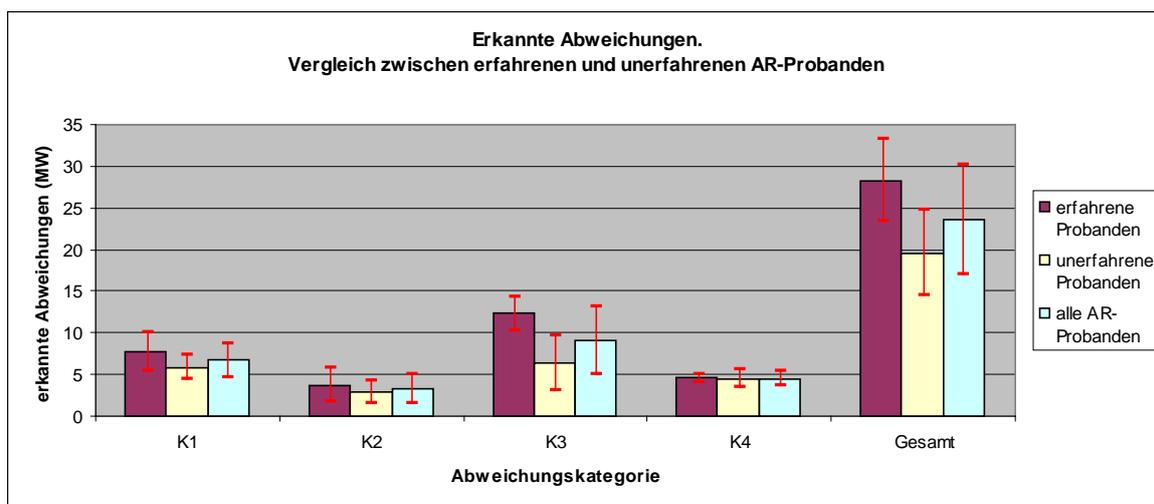


Abbildung 6-9: Erkannte Abweichungen, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen AR-Probanden

Abbildung 6-10 erfasst die Zahl von erkannten Abweichungen in 10-Minuten-Abschnitten. Innerhalb der ersten 30 Minuten zeigt sich sowohl bei erfahrenen als auch bei unerfahrenen Probanden ein Anstieg der erkannten Abweichungen (bis auf durchschnittlich 3,13) für jeden Zeitabschnitt. Der Anstieg kann als Einarbeitungszeit interpretiert werden kann. Dieses in der ersten Versuchsphase für erfahrene und unerfahrene Probanden identische Verhalten zeigt, dass der Umgang mit der AR-Technologie intuitiv möglich ist, wodurch Arbeitshypothese **H8** teilweise bestätigt wird.

Konkrete Lerneffekte können jedoch weder nachgewiesen noch widerlegt werden, da sich aus der unsteten Verteilung von Erkennungen je Zeitabschnitt im weiteren Versuchsablauf insgesamt keine konstante Erkennungsrate ableiten lässt.

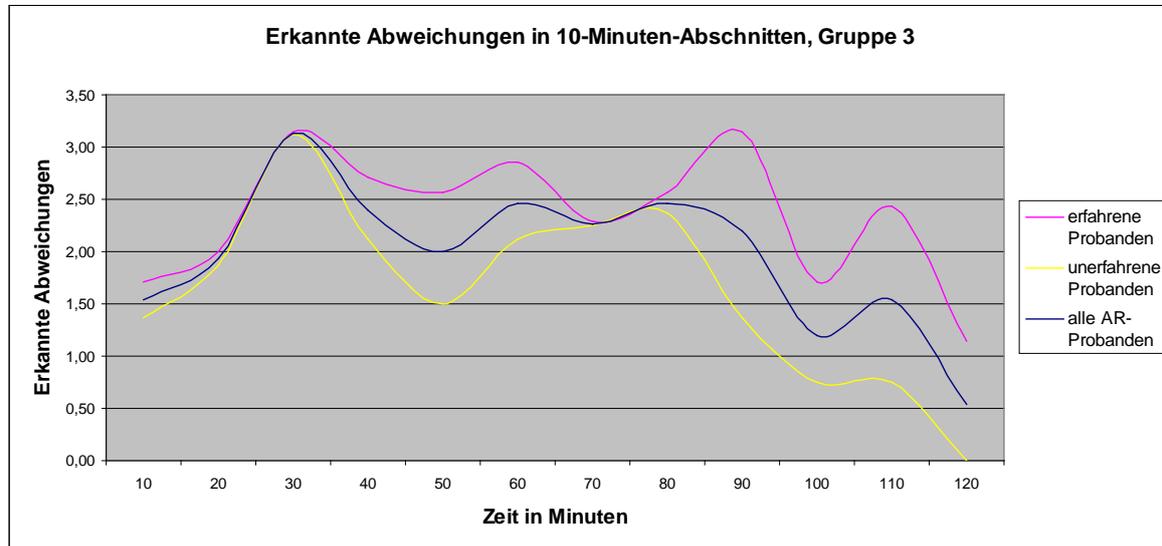


Abbildung 6-10: Erkannte Abweichungen in 10-Minuten-Abschnitten, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen AR-Probanden

Da sich der Vergleichsprozess bei der Gruppe der AR-Probanden in das Fotografieren und die Analyse der AR-Szene unterteilt, können zwei verschiedene Strategien bei diesen beiden Teilprozessen beobachtet werden:

1. Probanden erstellen Aufnahmen nach „Gutdünken“ und fertigten bei Bedarf weitere Aufnahmen an.
2. Probanden gehen strukturiert beim Fotografieren vor und erstellen aus definierten Perspektiven (parallel zu den Koordinatenachsen) Aufnahmen des Zusammenbaus und Detailfotos der einzelnen Baugruppen.

Das durchdachte Vorgehen beim Fotografieren bringt deutliche Vorteile im späteren Auswerteprozess. Vor allem Probanden mit Erfahrung im Umgang mit AR erzielen hier bessere Arbeitsergebnisse (vgl. Kapitel 6.5.1) und verringern den Suchaufwand nach Einzelteilmodellen erheblich. Folgenden Strategien werden bei Auswertung des AR-Szenarios beobachtet:

1. Einzelteile und Baugruppen werden in Reihenfolge der Modellliste in der AR-Software untersucht. Jeweils passenden Fotos werden sukzessive ausgewertet.
2. Einzelteile und Baugruppen werden in Reihenfolge der Darstellung auf der Zusammenbauzeichnung untersucht, wobei die jeweils passenden Fotos der Reihe nach ausgewertet werden.

3. Die Untersuchung findet sukzessive anhand der einzelnen Fotos statt, wobei die jeweils im Foto erkennbaren Einzelteilmodelle überlagert werden.
4. Bei Unsicherheit bezüglich einer Abweichung tritt der Proband mit der Vorrichtung in direkten Kontakt, um das entsprechende Detail in der Realität zu betrachten.
5. Bei Unsicherheit bezüglich einer Abweichung erstellt der Proband weitere Detailaufnahmen und analysiert diese in der AR-Software.

Bei der Einzelteiluntersuchung orientieren sich viele Probanden an den Objektlisten in der Software (Strategie 1) oder der Stückliste (Strategie 2), womit sie sich unbewusst auf die Vollständigkeit der Daten verlassen. Dadurch werden Fehler der Kategorie zwei (Fehlende Konstruktionsdaten) nur schlecht erkannt (vgl. Kapitel 6.5.1.2). Die wenigen Probanden, welche sukzessive alle erstellen Aufnahmen auswerten (Strategie 3) erkennen fehlenden Konstruktionsdaten deutlich besser, brauchen für die Auswertung aber mehr Zeit.

Bei Unsicherheiten bezüglich einer Abweichung erstellen die meisten Probanden zusätzliche Aufnahmen. Nur wenige suchen den direkten Kontakt zur Vorrichtung, obgleich diese Strategie ebenso erfolgreich ist und weniger Zeit in Anspruch nimmt. Die Analyse erfolgt demzufolge meist „offline“ räumlich getrennt von der Vorrichtung.

### **6.5.3 EZ-Skala**

Die Eigenzustandsskala beschreibt die subjektive Handlungslage einer Person durch Angabe von Staninewerten. Hohe Staninewerte für die einzelnen Faktoren bedeuten, dass die Probanden ihre gegenwärtige Handlungslage positiv einschätzen. Hierbei werden die beiden Zweige Motivation (EZ100) und Beanspruchung (EZ200) unterschieden (vgl. Kapitel 6.2.2).

#### **6.5.3.1 2D – technische Zeichnungen**

Die Auswertung der Staninewerte der Probandengruppe mit technischen Zeichnungen zeigt sowohl eine statistisch signifikante Verschlechterung ( $p = 0,029$ ) der Motivationslage [EZ100] als auch eine tendenzielle Verschlechterung der Beanspruchungslage [EZ200] der Probanden (vgl. Abbildung 6-11).

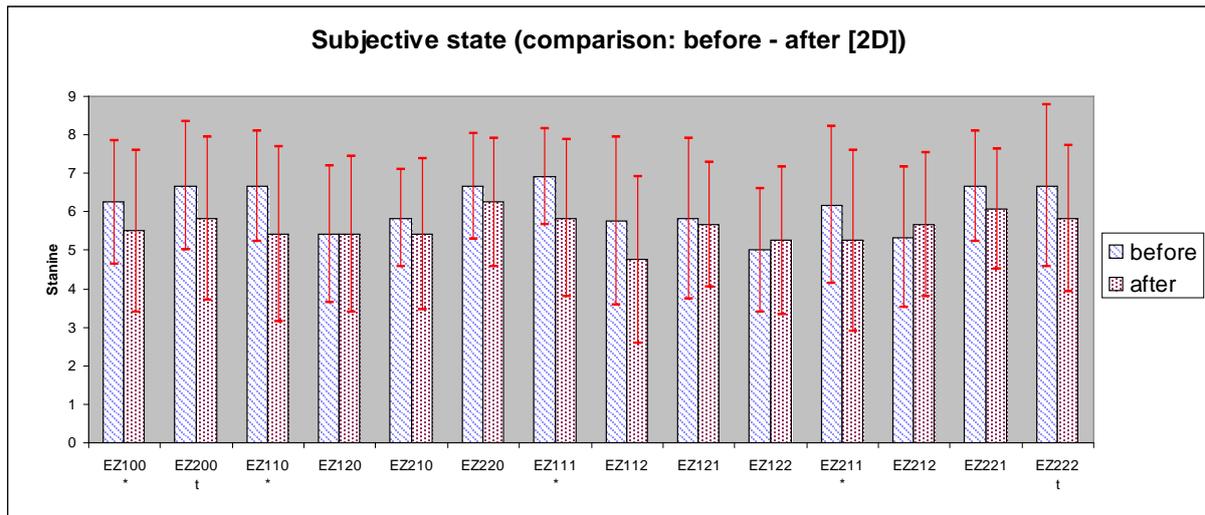


Abbildung 6-11: Vergleich der Staninewerte aus der EZ-Skala vor und nach dem Soll/Ist-Vergleich mit techn. 2D-Zeichnungen

Der motivationale Binärfaktor Anstrengungsbereitschaft [EZ111] verschlechtert sich signifikant ( $p = 0,033$ , Wilcoxon-Test), wodurch sich auch der übergeordnete Faktor Initiative [EZ110] signifikant negativ verändert ( $p = 0,048$ ). Bei den beanspruchungsbeschreibenden Faktoren verschlechtert sich die Stimmungslage (EZ211) signifikant ( $p = 0,034$ ) und die Schläfrigkeit [EZ222] tendenziell ( $p = 0,093$ ), so dass sich die gesamte Beanspruchungslage [EZ200] tendenziell verschlechtert ( $p = 0,065$ ).

### 6.5.3.2 3D – CAD Tool

Die Auswertung der Staninewerte von Probandengruppe zwei deutet auf eine statistisch signifikante Verschlechterung ( $p = 0,029$ ) der Motivationslage [EZ100] hin (vgl. Abbildung 6-12).

Die beiden motivationalen Binärfaktoren „Anstrengungsbereitschaft“ [EZ111] und „soziale Anerkennung“ [EZ121] verschlechtern sich tendenziell ( $p = 0,054$  und  $p = 0,096$ ); der übergeordnete Faktor Initiative [EZ110] signifikant ( $p = 0,046$ ). Bei den beanspruchungsbeschreibenden Faktoren nimmt die Erholtheit (EZ221) tendenziell zu ( $p = 0,085$ ), wodurch auch die Ermüdung [EZ220] insgesamt signifikant nachlässt ( $p = 0,33$ ).

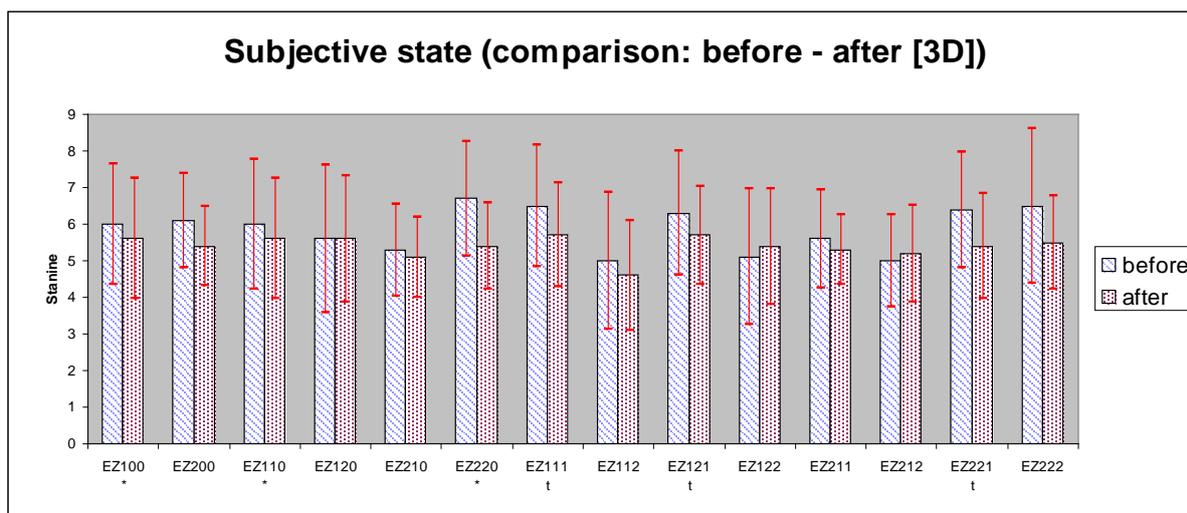


Abbildung 6-12: Vergleich der Staninewerte aus der EZ-Skala vor und nach dem Soll/Ist-Vergleich mit 3D

### 6.5.3.3 Augmented Reality

In den Daten von Gruppe drei lässt sich keine statistisch signifikante Veränderung der Motivations- (EZ100) oder Beanspruchungslage (EZ200) beim Vergleich von vorher zu nachher feststellen (vgl. Abbildung 6-13).

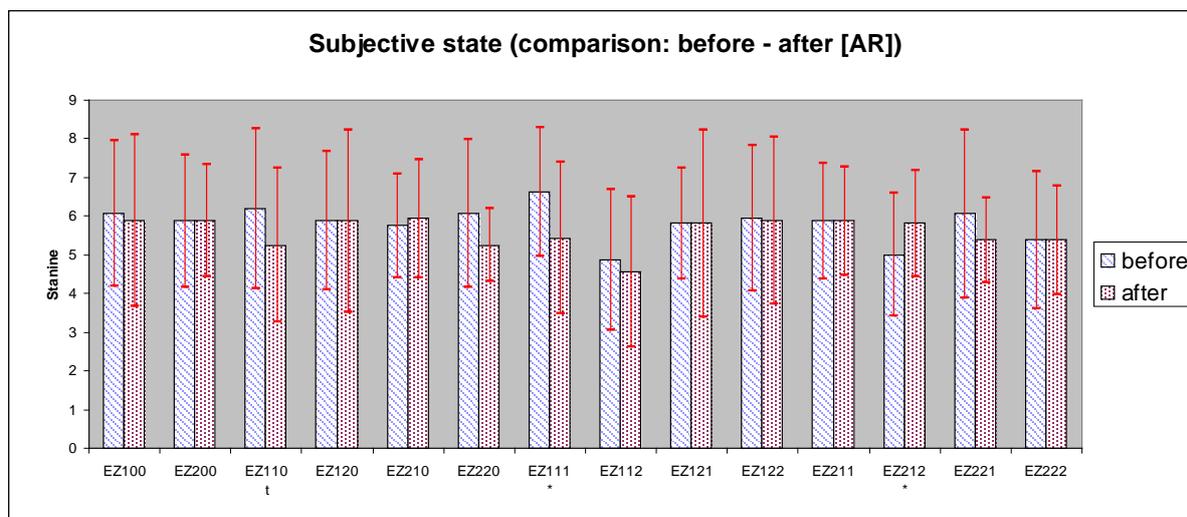


Abbildung 6-13: Vergleich der Staninewerte aus der EZ-Skala vor und nach dem Soll/Ist-Vergleich mit AR

Bei dem motivationalen Binärfaktor Anstrengungsbereitschaft (EZ111) ist eine signifikante Verschlechterung ( $p = 0,018$ , Wilcoxon-Test) festzustellen, was zu einer tendenziellen Verschlechterung ( $p = 0,096$ ) des übergeordneten Faktors Initiative (EZ110) führt. Im Gegensatz dazu verbessert sich der beanspruchungsbeschreibende Faktor Spannungslage (EZ212) nach dem Versuch signifikant ( $p = 0,042$ ). Abbildung 6-13 zeigt, dass sich der Stanine-Wert entsprechend erhöht. Da es sich bei EZ212 um einen umgepolten Faktor handelt (vgl. Kapitel 6.2.2), bedeutet dies ein höheres Maß an Entspannung der Probanden nach dem Versuch.

### 6.5.3.4 Zusammenfassung

Abbildung 6-14 fasst die Ergebnisse zur Untersuchung des Eigenzustandes aller Probandengruppen zusammen. Tendenzielle bzw. signifikante Veränderungen der einzelnen Binärfaktoren sind farbig hervorgehoben. Eine grüne Umrahmung kennzeichnet eine Verbesserung des beschriebenen Zustandes, wohingegen eine rote Umrahmung eine Verschlechterung beschreibt. Insgesamt ist die Belastung der Probandengruppe eins (2D) am größten, da sich die Motivationslage signifikant und die Beanspruchungslage tendenziell verschlechtert. Damit hat sich Hypothese **H5** bestätigt. Bei Probandengruppe zwei (3D) sinkt die Motivationslage der Probanden zum Ende des Versuches ebenfalls statistisch signifikant. Im Gegensatz dazu lässt sich bei Gruppe drei (AR) keine Verschlechterung der Motivations- oder Handlungslage feststellen, was die Hypothese **H4** nicht bestätigt.

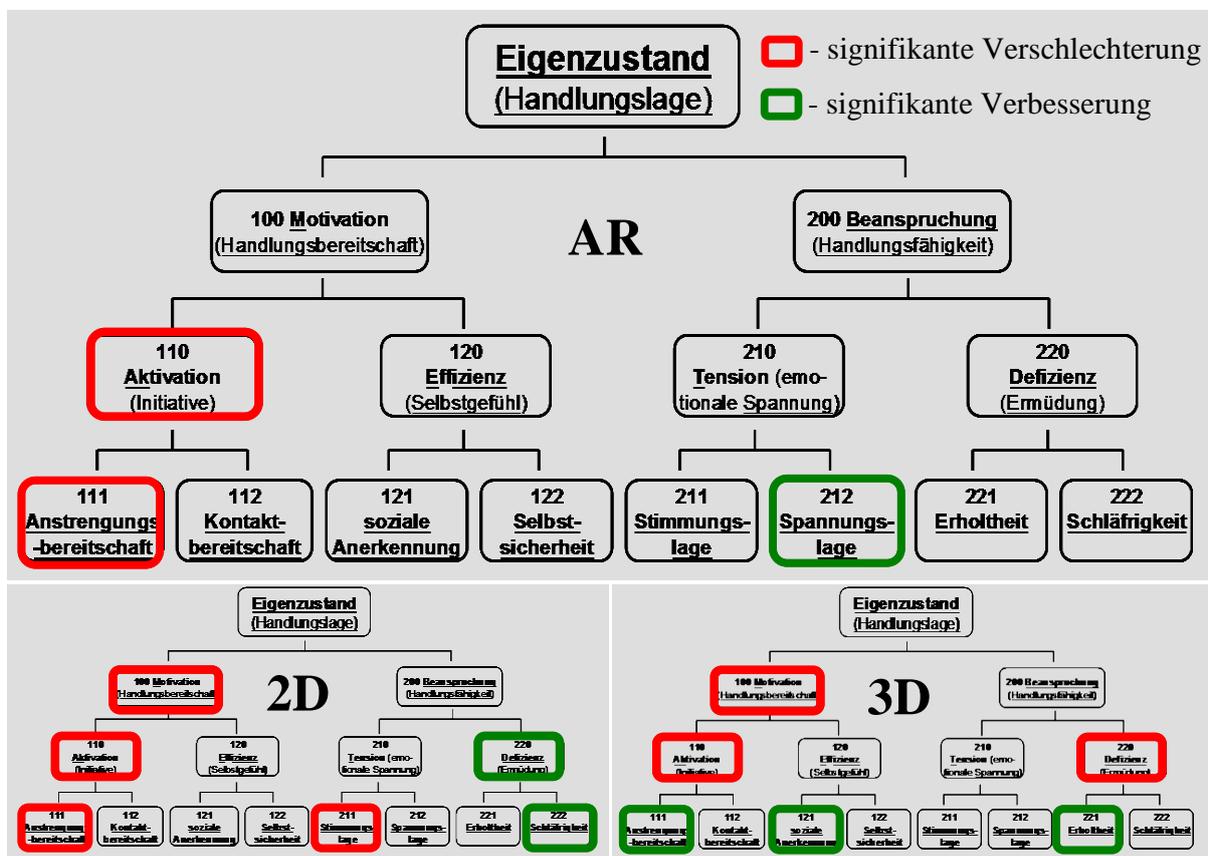


Abbildung 6-14: Vergleich der eingefärbten Stanine-Bäume für alle drei Technologien

Bei Probanden, die den Vergleich mit AR durchgeführt haben, sind weder signifikante negative Auswirkungen auf die Motivationslage (EZ100) noch auf Beanspruchung (EZ200) zu verzeichnen. Dies deutet darauf hin, dass der Einsatz der AR-Technologie im beschriebenen Anwendungsszenario bei den Nutzern eine hohe Akzeptanz findet.

## 6.5.4 AR-spezifische Untersuchungen

Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf Probanden der Gruppe drei.

### 6.5.4.1 Anzahl der Fotos – Abhängigkeiten

Die maximale Anzahl aufgenommener Fotos je Proband ist 52, die minimale 13. Abbildung 6-15 stellt das Fotografierverhalten von erfahrenen und unerfahrenen Anwendern gegenüber. Insgesamt gehen fünf Probanden nur einmal zur Vorrichtung, um sie zu fotografieren. Sechs Probanden führen insgesamt zwei, drei Probanden drei und ein Proband vier Fotografiertdurchgänge durch.

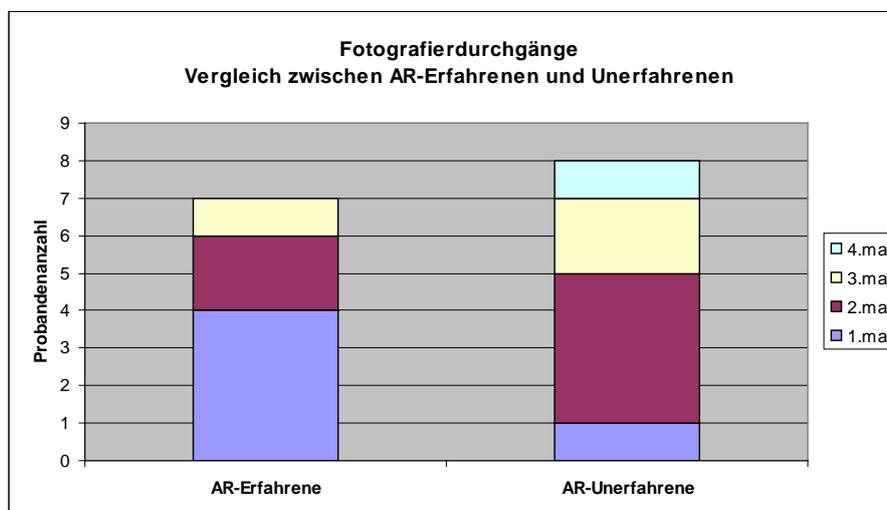


Abbildung 6-15: Anzahl der Fotografierdurchgänge bei erfahrenen und unerfahrenen Probanden

Es fällt auf, dass erfahrene Anwender deutlich weniger Fotografierdurchgänge absolvieren. Nur drei von sieben erfahrenen Probanden erstellten zusätzliche Aufnahmen. Hingegen wiederholen sieben von acht unerfahrenen Probanden den Fotografiervorgang mindestens ein Mal. AR-Experten gehen beim Fotografieren offensichtlich strategischer vor und führen den Soll/Ist-Vergleich mit den im ersten Durchgang erstellten Aufnahmen durch. Bei unerfahrenen Probanden besteht mehr Bedarf, bisher fehlende Bilddetails/-perspektiven zu ergänzen.

Obleich AR-Experten weniger Fotografierdurchgänge absolvieren, erstellten Sie mehr Aufnahmen ( $29,14 \pm 11,95$ ) als unerfahrene ( $19,63 \pm 7,07$ ) (Abbildung 6-16, rechts). Sie verbringen in Summe mehr Zeit mit dem Fotografiervorgang ( $8,43 \pm 5,06$  min) als unerfahrene Probanden ( $7,13 \pm 1,64$  min) (Abbildung 6-16, links), können mit der Strategie weniger Fotografierdurchgänge jedoch wesentlich schneller die gewünschte Anzahl an Aufnahmen erstellen (ca. 17,35 s je Foto) als Unerfahrene (ca. 21,78 s je Foto).

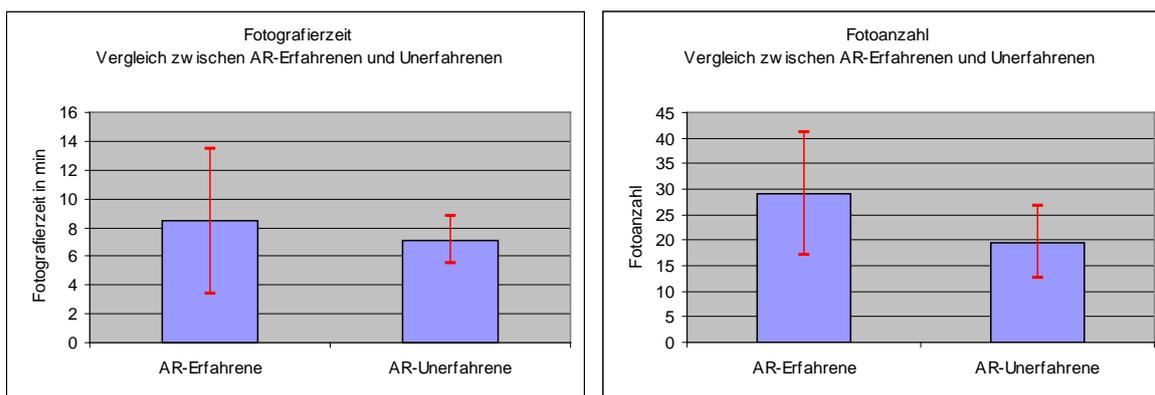


Abbildung 6-16: Fotoanzahl und Fotografierzeit von erfahrenen und unerfahrenen AR-Probanden

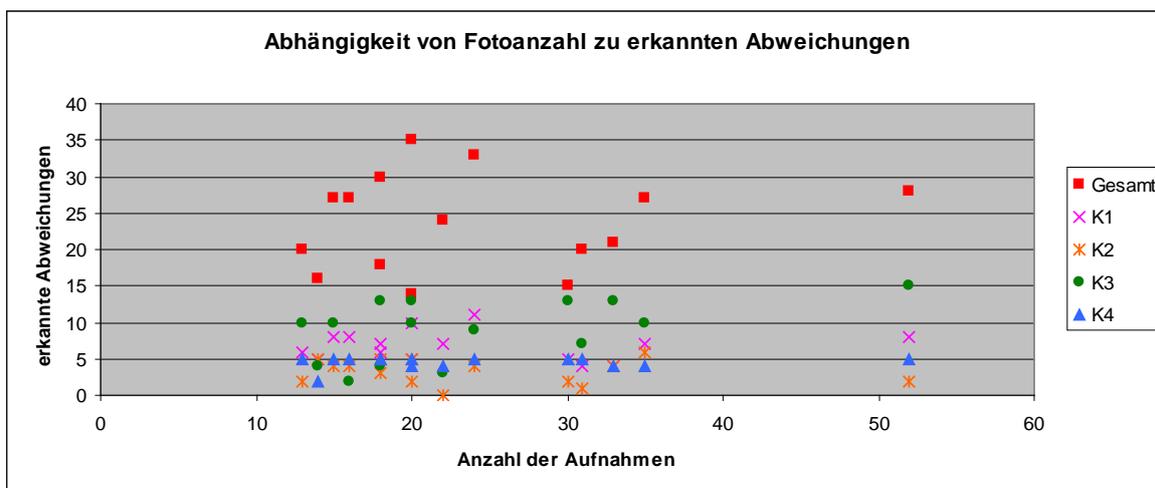


Abbildung 6-17: Abhängigkeit von Fotoanzahl zu erkannten Abweichungen

Für jeden Probandenversuch mit Augmented Reality werden die Anzahl der Fotos und die Zahl der identifizierten Abweichungen erfasst (Abbildung 6-17). Es ist eine breite Streuung der Anzahl erkannter Abweichungen über die Anzahl der Fotos zu erkennen. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass der „beste“ (35 erkannte Abweichungen) und auch der „schlechteste“ (14 erkannte Abweichungen) Kandidat mit der gleichen Fotoanzahl (20) gearbeitet haben. Insgesamt lässt sich kein Zusammenhang von Aufnahmenanzahl und Erkennungsanzahl feststellen, was die Hypothese **H6** nicht bestätigt.

### 6.5.4.2 Genutzte Funktionen der AR-Software

Die Versuchsbetreuung protokollierte für jede erkannte Abweichung die vom Probanden genutzten Softwarewerkzeuge des AR-Systems. Abbildung 6-18 stellt die Häufigkeit des Einsatzes der einzelnen Funktionen sowohl gesamtheitlich als auch für jede Abweichungskategorie separat dar. Das Ein-/Ausblenden von virtuellen Objekten (65,92%) und das Herinzoomen in die AR-Ansichten (55,49%) sind die am häufigsten verwendeten Funktionen.

Viel Verwendung finden auch Schnittebenen (41,13%) und das Betrachten der AR-Szene in verschiedenen Perspektiven/Fotos (31,55%). Das Verschieben virtueller Objekte kommt bei 16,34% aller Abweichungserkennungen zum Einsatz. Die virtuelle Ansicht des Szenarios (2,54%), die Drahtgitterdarstellung einzelner Modelle (1,41%) sowie die verdeckende Darstellung von Objekten finden während der Auswertung kaum Anwendung. Die Funktionen Transparenz und Objektvermessung werden von keinem Probanden direkt zur Identifikation von Abweichungen eingesetzt.

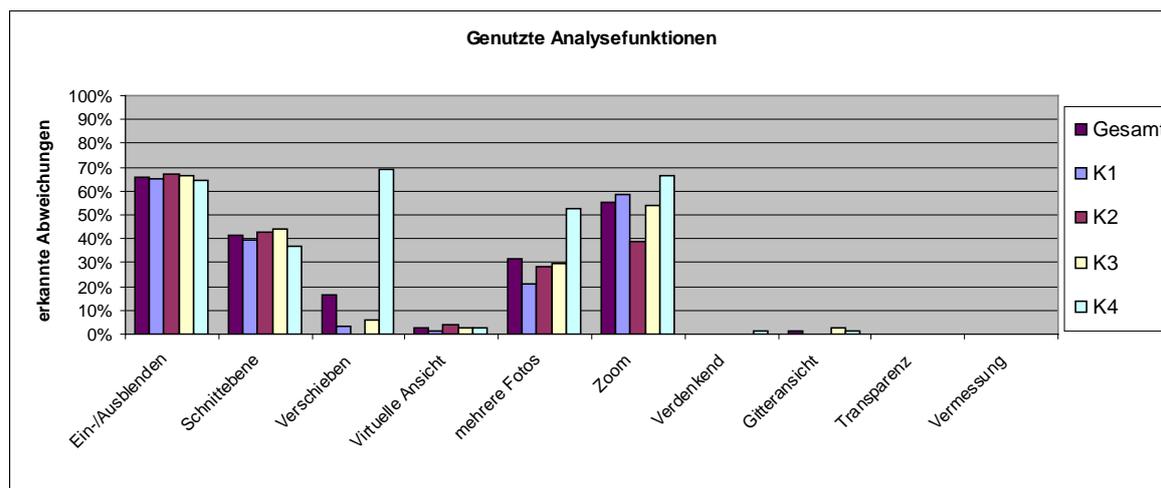


Abbildung 6-18: Einsatz der Analysefunktionen des AR-Systems

Bei der Verwendung von Funktionen zur Identifikation von Positionsabweichungen (K4) zeigt sich eine besondere Auffälligkeit. So kommt das Verschieben von Objekten sehr oft zur Anwendung (69,12%), wohingegen diese Funktion bei den anderen Kategorien relativ wenig eingesetzt wird (K1 = 2,97%, K2 = 0%, K3 = 5,84%). Der hohe Erkennungsgrad von Positionsabweichungen (vgl. Kapitel 4.2.2.3) und der verstärkte Einsatz dieser Funktion zeigen, dass für bestimmte Arten von Soll/Ist-Abweichungen individuell angepasste Analysefunktionen notwendig sind. Mit geeigneten Analysefunktionen werden optimale Vergleichsergebnisse erreicht. Insgesamt wird Arbeitshypothese **H7** bestätigt, da die zur Verfügung gestellten Analysewerkzeuge in unterschiedlich starker Ausprägung eingesetzt wurden.

### 6.5.5 Probandenfeedback

Nach dem Versuch füllten die Probanden ein Feedbackformular aus, in dem sie anhand von fünf Aussagen eine Einschätzung der persönlichen Arbeitsleistung vornahmen. Der Zustimmunggrad der Probanden zur jeweiligen Aussage konnte auf einer Ordinalskala von 1 („nicht zutreffend“) bis 5 („völlig zutreffend“) bewertet werden. Abbildung 6-19 zeigt die Ergebnisse dieser Befragung.

Die Gruppe der AR-Probanden stimmt der Aussage alle Abweichungen erkannt zu haben am stärksten zu, wohingegen Probanden mit technischen 2D-Zeichnungen diesbezüglich am unsichersten sind. Im Gegensatz dazu geben diese beiden Probandengruppen an, die zur Verfügung stehende Zeit als ausreichend zu empfinden. Daraus lässt sich ableiten, dass Probanden, die mit technischen Zeichnungen arbeiten der Meinung sind nicht alle Abweichungen erkannt zu haben, dies aber durch eine Verlängerung der Untersuchungsdauer nicht wesentlich zu beeinflussen ist. Nur die Probanden der Gruppe zwei (CAD) empfanden die Versuchszeit als zu kurz. Damit lässt sich Arbeitshypothese **H2** nicht bestätigen.

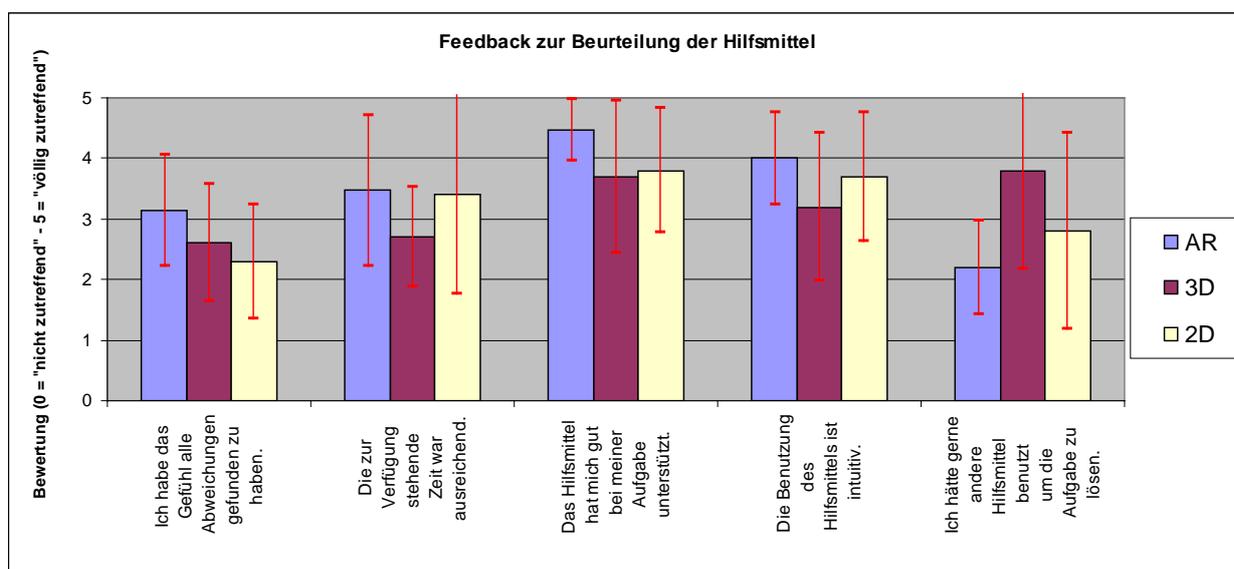


Abbildung 6-19: Probandenfeedback

Alle Probanden sind der Meinung, bei der Bewältigung der Versuchsaufgabe gut durch das zur Verfügung gestellte Hilfsmittel unterstützt worden zu sein, wobei die AR-Technologie offensichtlich am meisten überzeugt. Dies wird durch die geringe Standardabweichung dieser Antwort bestätigt. Probanden, welche den Vergleich mit dem CAD-System absolvierten, empfanden dieses Vorgehen als weniger intuitiv. Sie würden vorzugsweise andere Hilfsmittel verwenden, um den Soll/Ist-Vergleich durchzuführen. Probanden mit technischen Zeichnungen stimmten dem Wunsch nach alternativen Hilfsmitteln eingeschränkt zu. AR-Probanden sind mit ihrem Vergleichswerkzeug weitgehend zufrieden. Dies bestätigt die Ergebnisse der Auswertung der EZ-Skala, wonach die AR-Technologie von den Anwendern akzeptiert wird.

Die AR-Probanden äußerten Ideen zur Weiterentwicklung des AR-basierten Soll/Ist-Vergleichs. Der häufigste Vorschlag ist die videobasierte Visualisierung der AR-Szene (6-mal; 40 %) gefolgt von der Verwendung eines HMD (2-mal; 13,3 %). Darüber hinaus wünschten sich drei Probanden (20 %) die Möglichkeit, eine 3D-Rekonstruktion der realen

Vorrichtung erzeugen zu können, um diese mit den Konstruktionsdaten abzugleichen. Als klare Vorteile des beim Versuch genutzten AR-Setups wurden die intuitive Bedienbarkeit, die einfache Handhabung und die von der Vorrichtung räumlich getrennte Auswertung erkannt. Nachteile sahen die Probanden bei der perspektivischen Einschränkung durch die Fotografien und fehlendes Feedback zur erreichten Überlagerungsgenauigkeit. Weiterhin wurde angemerkt, dass Abweichungen der Kategorie zwei (Fehl-SOLL) schwierig zu identifizieren sind. Bei der AR-Überlagerung tritt keine Veränderung im betreffenden Bildausschnitt auf. Stattdessen lenken Überlagerungen in anderen Bildbereichen die Aufmerksamkeit von den betreffenden Bildbereichen ab.

### 6.5.6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchung stützen die Hypothese **H1**, da Probanden mit AR in der hier beschriebenen Studie durchschnittlich mehr Abweichungen identifizieren als andere. Weiterhin bestehen deutliche Unterschiede bei der Erkennung von Abweichungen verschiedener Kategorien, was die Hypothese **H3** bestätigt. So lassen sich Positionsabweichungen durch AR beispielsweise besonders gut identifizieren, wohingegen fehlende Konstruktionsdaten relativ schlecht erkannt werden.

Entgegen der Hypothese **H4** stellt sich bei den AR-Probanden gegen Ende des Versuchs keine Verschlechterung der Handlungslage ein. Wie vermutet verändert sich diese jedoch bei Probanden, die mit technischen Zeichnungen arbeiteten, am deutlichsten negativ. Das stützt die Hypothese **H5**.

Hypothese **H6** wird nicht bestätigt, da kein direkter Zusammenhang zwischen der Fotoanzahl und der Anzahl der erkannten Abweichungen festzustellen ist.

Hypothese **H7** wird gestützt. Es gibt sowohl Analysefunktionen, die fast immer zum Einsatz kommen und andere, die überhaupt nicht benutzt werden. Die Ergebnisse der Studie können die Hypothese **H8** weder stützen noch widerlegen. Die Annahme, dass mit dem AR-System vertraute Probanden einen Vorteil beim Vergleich haben, wird bestätigt. Kurzfristige Lerneffekte lassen sich im Rahmen der Studie jedoch weder bei unerfahrenen noch bei erfahrenen Anwendern erkennen.

Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass sich die AR-Technologie grundsätzlich zum Erkennen von geometrischen Abweichungen eignet und die Erkennungsrate gegenüber anderen Verfahren gesteigert werden kann. Über diese allgemeine Aussage hinaus lassen sich zwei wichtige Erkenntnisse ableiten:

1. AR eignet sich besonders gut zum Erkennen und Quantifizieren von Positionsabweichungen.
2. Es existieren softwareseitig Analysefunktionen, die sich optimal zur Identifikation bestimmter Abweichungsarten eignen.

Zur Optimierung der AR-Technologie für Soll/Ist-Vergleiche sind weiterführende Versuchsreihen notwendig, in denen dediziert Analysefunktionen zur Identifikation von bisher ungenügend erkannten Abweichungsarten genutzt werden. Insbesondere bei der Erkennung von Soll/Ist-Abweichungen der Kategorie zwei, bei denen Teile des virtuellen Modells komplett fehlen, besteht starker Handlungsbedarf.

Neben alternativen Analysefunktionen haben andere Visualisierungstechniken ebenfalls Potenzial das Untersuchungsergebnis zu verbessern. So ist weiterhin zu untersuchen, inwieweit eine videobasierte Überlagerung oder ein HMD-Einsatz das Ergebnis beeinflussen. Der im Rahmen dieser Studie entwickelte Versuchsaufbau kann als Referenzszenario für folgende Untersuchungen dienen. Einerseits lassen sich dadurch die Arbeitsergebnisse der AR-Technologie direkt mit den Ergebnissen der Folgeversuche vergleichen. Andererseits ist durch die hier beschriebene Methode der Vergleich der Beanspruchungslage von alternativen Vorgehensweisen mit der AR-Technologie möglich.

Die vorliegende Studie verdeutlicht weiterhin, dass das eingesetzte AR-System intuitiv bedienbar ist. Auch unerfahrene Anwender konnten es erfolgreich einsetzen. Dennoch zeigt sich, dass die Erfahrung der Anwender das Vergleichsergebnis wesentlich beeinflusst. Die Daten ermöglichten keine konkrete Aussage darüber, ob und wie schnell sich Lerneffekte bei unerfahrenen Anwendern einstellten. Für den Transfer der Technologie in den produktiven Einsatz - insbesondere im Hinblick auf eine Strategie zur Einführung - ist diese Fragestellung für zukünftige Studien von besonderer Bedeutung.

## 7 Schlussbetrachtungen

### 7.1 Zusammenfassung

Der Einsatz der Digitalen Fabrik ist eine von mehreren Möglichkeiten für produzierende Unternehmen, nachhaltig auf die Einflüsse der Unternehmensumwelt zu reagieren. Die Einführung und die Anwendung von Techniken der Digitalen Fabrik stellen Investitionen dar, die dem Anspruch der Wirtschaftlichkeit nur gerecht werden können, wenn die Daten und Informationen der Digitalen Fabrik mit der realen Fabrik übereinstimmen. Soll/Ist-Vergleiche mittels AR haben das Potenzial, kostengünstig schnelle Aussagen über die Aktualität des Datenbestandes der Digitalen Fabrik zu liefern. Die vorliegende Arbeit hatte daher zum Ziel, die AR-Technologie für Soll/Ist-Vergleiche von Betriebsmitteln in der Fertigungsplanung zu untersuchen und nutzbar zu machen. Darunter wurden eine Analyse des Vergleichsprozesses und die Identifikation von Handlungsbedarf zur Prozessoptimierung verstanden. Der Fokus wurde im Verlauf der Arbeit auf den Registrierungsprozess in industriellen Produktionsumgebungen und auf die Auswertung von AR-Informationen gelegt. Neben einer Prozessverbesserung konnte das Potenzial der Technologie sowohl mit einer Probandenstudie als auch mit Pilotprojekten nachgewiesen werden.

Im Anschluss an die *Einleitung* (Kapitel 1) führt die Arbeit in die *wissenschaftlichen Grundlagen* (Kapitel 2) der betroffenen Disziplinen ein. Die Aufteilung der Grundlagen in die Themen Augmented Reality, Fabrik- und Produktionsplanung, sowie Digitale Fabrik vermittelt einen Eindruck vom interdisziplinären Charakter der Arbeit, die eine Brücke zwischen der Informatik und der Ingenieurwissenschaft schlägt. Das Grundlagenkapitel definiert weiterhin den Begriff Soll/Ist-Vergleich, grenzt ihn im Bezug zur Aufgabenstellung thematisch ab und erläutert grundlegende Registrierungsmethoden. Darauf aufbauend wurde der *Stand der Technik* (Kapitel 3) von Soll/Ist-Vergleichen sowohl mit als auch ohne Augmented Reality aufgezeigt. Auf Basis der bekannten Forschungsarbeiten zu AR-basierten Soll/Ist-Vergleichen wurden insbesondere die Grenzen aktueller Lösungen betrachtet. Dabei wurde allgemeiner Handlungsbedarf identifiziert, der neben technischen vor allem anwendungs- bzw. prozessspezifische Fragestellungen aufwarf. Eine Marktübersicht aktueller AR-Softwaresysteme und -entwicklungsplattformen bildete die Grundlage zur Auswahl eines

AR-Systems, an dem die offenen Fragestellungen aus praxisorientierter Sicht untersucht wurden. Die AR-Entwicklungsplattform Unifeye SDK stellte sich dafür als geeignet heraus. Anschließend wurden die detaillierte Untersuchung des Geschäftsprozesses „Soll/Ist-Vergleich von Betriebsmitteln in der Fertigungsplanung“, die Identifikation von konkretem Handlungsbedarf innerhalb der einzelnen Prozessphasen und die Verbesserung eines der identifizierten Aspekte als Schwerpunkte der Arbeit festgelegt.

Die *Anforderungsanalyse* (Kapitel 4) ist entsprechend Ulrichs Vorgehensmodell zur anwendungsorientierten Forschung der Erfassung und Untersuchung des relevanten Anwendungszusammenhangs gewidmet [Ulr84]. Einleitend gibt das Kapitel einem Überblick über Betriebsmittel aus dem Karosserierohbau in der Automobilindustrie und die einzelnen Phasen des Betriebsmittellebenszyklusses sowie den damit in Zusammenhang stehenden Ursachen für Soll-/Ist-Abweichungen. Weiterhin wurden Bezugssysteme und Referenzpunkte von Karosseriebaubetriebsmitteln beschrieben, sowie vergleichbare Betriebsmitteleigenschaften abgegrenzt. Anschließend wurde der Geschäftsprozess des AR-basierten Soll-/Ist-Vergleichs im Detail untersucht. Für die Teilprozesse Registrierung, der damit verbundenen Systemkalibrierung, dem Aufnahmeprozess sowie der Auswertung von AR-Szenarien wurde im Rahmen dieser Arbeit hoher Handlungsbedarf festgestellt. Das Kapitel schließt mit einem konkreten Vorgehensplan zur Verbesserung des Registrierungsprozesses und zur anschließenden Untersuchung der offenen Fragen zu den Teilprozessen Datenaufnahme und -auswertung.

Das Anwendungsszenario und die eingesetzte Trackingtechnologie beeinflussen maßgeblich den Registrierungsprozess. Daher wurden für die *Verbesserung des Registrierungsprozesses* (Kapitel 5) anhand anwendungsspezifischer Bewertungskriterien geeignete Trackingtechnologien ausgewählt. Für den Einsatz im Nah- und Fernbereich stellte sich einerseits adaptergestütztes optisches Markertracking und andererseits der Einsatz eines Koordinatenmessgerätes als geeignete Trackingtechnologien heraus. Für beide Technologien wurden AR-Systemkonfigurationen realisiert und Registrierungsprozesse für die industrielle Einsatzumgebung entwickelt. Die Integration der ausgewählten Technologien in das AR-System erforderte die Entwicklung spezifischer Kalibrierkonzepte. So entstand in Anlehnung an Methoden der Messtechnik ein Kalibrierverfahren zur individuellen Kalibrierung von Vorrichtungsadaptoren für optische Trackingmarker. Ferner wurde im Rahmen der Arbeit ein Kalibrierprozess für ein Lasertrackingsystem entwickelt, das die Kalibrierung der intrinsischen Kameraparameter und die Target-Kamera-Kalibrierung in einem Arbeitsgang gestattet und darüber hinaus die Kalibrierung des optischen Systems für den Einsatz in großen

Arbeitsentfernungen optimiert. Im Ergebnis der Prozessverbesserung lagen AR-Systeme vor, die eine schnelle und präzise Registrierung im jeweiligen industriellen Arbeitsumfeld ermöglichen. Beide Systeme wurden im Rahmen von Pilotprojekten evaluiert und konnten mit vertretbarem Aufwand erfolgreich und reproduzierbar im Anwendungsumfeld registriert werden. Die Verbesserung des Registrierungsprozesses wurde damit erreicht. Überdies bestätigten die Erkenntnisse aus den Pilotprojekten weiteren Handlungsbedarf beim manuellen Auswerteprozess von AR-Szenen und beim Identifizieren von Abweichungen, da bisher nicht verifiziert war, in welchem Umfang vorhandene Abweichungen erkannt werden.

Um diese und weitere Fragestellungen zu beleuchten, wurden im Folgenden *Untersuchungen zur Datenaufnahme und -auswertung* (Kapitel 6) durchgeführt. Als Untersuchungsmethode wurde eine Probandenstudie ausgewählt. Neben der Untersuchung von Datenaufnahme und Szenenauswertung sollte diese Methode auch eine Analyse der Anwenderbelastung und des Potenzials der AR-Technologie gegenüber alternativen Vergleichsmethoden ermöglichen. Es wurde ein anwendungsnahes Referenzszenario geschaffen, in dem Probanden aus drei verschiedenen Versuchsgruppen einen Soll/Ist-Vergleich durchführten. Insgesamt konnte nachgewiesen werden, dass sich die AR-Technologie grundsätzlich zur Erkennung von geometrischen Abweichungen eignet und die Erkennungsrate gegenüber anderen Verfahren gesteigert wird. Handlungsbedarf besteht bei Abweichungen der Kategorie zwei, bei denen Teile des digitalen Modells fehlen. Diese wurden nur schlecht erkannt, da sich die Probanden indirekt auf die Vollständigkeit der Modelle verließen. Dahingegen eignet sich die Technologie insbesondere zur Identifikation und Quantifizierung von Positionsabweichungen. Darüber hinaus war keine psychische Mehrbelastung der Probanden durch die AR-Technologie festzustellen, was für die Anwenderakzeptanz der Technologie spricht.

## **7.2 Erkenntnisgewinn**

Die Geschwindigkeit und die Komplexität aktueller Produktentwicklungen in der Automobilindustrie sind heute ohne die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik nicht beherrschbar. Die vorliegende Arbeit leistet einen wesentlichen Beitrag zur Synchronisierung der digitalen mit der realen Fabrik, in der die eigentliche Wertschöpfung stattfindet. Durch eine so gesteigerte Planungsqualität wird der Nutzen der Digitalen Fabrik weiter verstärkt und sichert damit den Wettbewerbsvorteil produzierender Unternehmen am internationalen Markt.

Bisher verursacht der Einsatz der AR-Technologie im Produktionsplanungsprozess einen Mehraufwand. Dieser liegt beispielsweise im Rüstaufwand für Trackingtechnologie, Bereitstellung und Aufbereitung von Konstruktionsdaten, Vermessungsarbeiten zur Systemregistrierung, Systemkalibrierungen, sowie in der manuellen Auswertung und Aufbereitung von Vergleichsergebnissen. Der produktive Einsatz der AR-Technologie wird dadurch wesentlich eingeschränkt. Zur Integration der AR-Technologie in den Produktionsplanungsprozess muss der genannte Mehraufwand durch Berücksichtigung der Randbedingungen des Anwendungsszenarios reduziert werden.

Der im Rahmen der Arbeit analysierte Soll/Ist-Vergleich von Betriebsmitteln eines Automobilherstellers zeigt verschiedene Anwendungsfälle mit unterschiedlichen Randbedingungen. Diese erfordern unterschiedliche Trackingverfahren. Ein universell einsetzbares ist bislang nicht verfügbar. Insbesondere für den Einsatz im Nahbereich eignet sich optisches Markertracking mit einer adapterbasierten Registrierung. Zum Abgleich einer großen Anzahl von Objekten mit identischer Geometrie wird der Einsatz von individuellen Adaptern empfohlen. Andernfalls sollten allgemeine Geometrieadapter eingesetzt werden. Im Fernbereich ist die Anwendung von Lasertrackern zur effizienten Registrierung sinnvoll. Ferner ist eine Onlineauswertung mittels Livevisualisierung der AR-Szene effizienter als eine fotobasierte Auswertung.

AR-basierte Soll/Ist-Vergleiche eignen sich unterschiedlich gut zum Erkennen verschiedener geometrischer Abweichungen. So können Positionsabweichungen besonders gut identifiziert und quantifiziert werden. Fehl-SOLL-Abweichungen werden hingegen nur schlecht erkannt. Bei Fehl-IST- und Gestaltabweichungen kann die Erkennungsrate gegenüber anderen Verfahren gesteigert werden.

Die AR-Technologie ist intuitiv für Soll/Ist-Vergleiche einsetzbar. Dies deckt sich mit der durch die EZ-Skala und das Probandenfeedback nachgewiesenen Nutzerakzeptanz. Trotz unterschiedlicher Vorerfahrungen können Anwender effizient damit arbeiten. Erfahrene Anwender gehen jedoch strukturierter bei der Datenaufnahme und -auswertung vor, wodurch sie bessere Ergebnisse erzielen.

Der Einsatz der AR-Technologie verringert schon heute Änderungskosten und Umsetzungsaufwand, da nachträgliche Anpassungen vor Ort minimiert werden. Die Erkenntnisse aus den durchgeführten Pilotprojekten und der Probandenstudie zeigen jedoch weiteren Handlungsbedarf zur Optimierung AR-basierter Soll/Ist-Vergleiche auf.

### 7.3 Ausblick

Derzeit werden nicht alle Arten von Abweichungen zwischen digitalem Modell und realer Anlage erkannt. Insbesondere bei Soll/Ist-Abweichungen der Kategorie zwei, bei denen Teile des virtuellen Modells komplett fehlen, sind weiterführende Untersuchungen notwendig, um geeignete Analyseprozesse zu entwickeln. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass eine standardisierte Vorgehensweise zur Auswertung der AR-Szene notwendig ist.

Eine weitere offene Fragestellung ist die Verwertung von Ergebnissen eines AR-gestützten Soll/Ist-Vergleichs. Derzeit existiert keine standardisierte Ergebnisdarstellung, so dass eine Interpretation des Ergebnisses durch den nachfolgenden Bearbeiter notwendig ist. Dabei besteht die Gefahr eines Missverständnisses und daraus resultierender Planungsfehler. Die Entwicklung einer standardisierten Ergebnisaufbereitung muss Schwerpunkt zukünftiger Forschungsaktivitäten sein.

Mit dem bisher eingesetzten System ist die Visualisierung des Gesamtmodells einer Werkhalle (2 Milliarden Polygone) nicht möglich. Erste Ansätze zur interaktiven Visualisierung großer Datenmengen in AR-Szenarien haben Scheer et al. im Rahmen des AVILUS-Projekts vorgestellt [SM11]. Diese Methodik muss in das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte AR-System für den Einsatz im Large-Area-Bereich integriert werden.

Im Zusammenhang mit der Weiterverwertung der Ergebnisse aus AR-basierten Soll/Ist-Vergleichen ist es weiterhin notwendig, Geometrieinformation von der realen in die digitale Fabrik zurückzuführen. Dies ist mit den derzeit eingesetzten Methoden nur punktuell und mit hohem manuellem Aufwand möglich. Aktuelle Forschungsarbeiten widmen sich diesem Thema [KB09].

Die konsequente Zusammenführung der oben genannten Anforderungen resultiert in einer automatisierten Auswertung von AR-Szenen. Dies vermeidet manuellen Aufwand, reduziert Fehler und ermöglicht das Potenzial AR-basierter Soll/Ist-Vergleiche voll auszuschöpfen. Dadurch werden signifikante Planungszeitverkürzungen sowie Produktivitäts- und Qualitätssteigerungen erreicht. Somit ermöglichen AR-basierte Soll/Ist-Vergleiche die Reduzierung von Realisierungszeiten und damit an den Markt angepasste Produktlebenszyklen.



## Literaturverzeichnis

- [ABB+01] R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier und B. Macintyre: Recent advances in augmented reality. *Computer Graphics and Applications*, 21:34–47, 2001.
- [Ada04] M. Adams: The Top Ten Technologies: #3 Augmented Reality. <http://www.naturalnews.com/001333.html>, July 2004.
- [ADEK05] V. Arnold, H. Dettmering, T. Engel und A. Karcher: *Product Lifecycle Management beherrschen*. Springer Verlag, Berlin 2005.
- [AHKB10] A. Alberdi, A. Hoffmeyer, A. König und C. Bade: Fabrik-DMU und Augmented Reality gestützte Bauabnahme in Chattanooga. In: 6. Internationaler Fachkongress Digitale Fabrik @ Produktion - Zwei Welten wachsen zusammen. Automobil Produktion. Fulda, Germany, Oktober 2010.
- [Ale05] T. Alexander: Virtual, Mixed, and Augmented Survey – Germany. In *Proceedings: System Interaction - National Research Activities in Augmented, Mixed and Virtual Environments*. NATO RTO, Canada, 2005.
- [Alt02] T. Alt: *Augmented Reality in der Produktion*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau und Volkswagen AG Wolfsburg, 2002.
- [Ang09] G. Angermeier: *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (Pmbok Guide)*. Project Management Institute, 4. Auflage, ISBN 978-1933890661, 30. Juni 2009. Referenziert über <http://www.projektmagazin.de/glossar/gl-0735.html>, Stand: 05.10.2009.
- [ART09] A.R.T. GmbH. “A.R.T. GmbH - your expert for infrared optical tracking systems”. <http://ar-tracking.eu/index.php>, 2009.
- [AT00] R. Anderl und D. Trippner (Hrsg.): *SETP – Standard for the Exchange of Product Model Data*. Teubner Verlag, Stuttgart 2000.
- [Azu97] R. Azuma: A survey of Augmented Reality. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6, 4, pp. 335–385, 1997.

- [Bad06] C. Bade: Test und Erweiterung eines fotobasierten Augmented Reality Systems für Soll/Ist-Vergleiche von Fertigungsanlagen. Diplomarbeit, Volkswagen AG, Wolfsburg 2006.
- [BB95] S. S. Beauchemin und J. L. Barron: “The Computation of Optical Flow”. ACM Computing Surveys, Vol. 27, No. 3, pp. 433–467, 1995.
- [BBK+01] M. Bauer, B. Bruegge, G. Klinker, A. MacWilliams, T. Reicher, S. Reiß, C. Sandor und M. Wagner: Design of a component based augmented reality framework. In International Symposium on Augmented Reality ISAR, 2001.
- [BEFW97] J. Borenstein, H.R. Everett, L. Feng und D. Wehe: Mobile Robot Positioning & Sensors and Techniques. In: Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots. Vol. 14 No. 4, pp. 231 – 249, 1997.
- [BH08] C. Bade und A. Hoffmeyer: Industrielle Anwendung von Augmented Reality in der Fertigungsplanung bei der Volkswagen AG. In: Tagungsband der 11. IFF Wissenschaftstage: Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. VR und AR - Automotive, 2008 - ISBN 978-3-8167-7630-7.
- [BHK09] A. Barczok, G. Himmelein und P. König: Mit dem Dritten sieht man besser – Augmented Reality: Computer-unterstützter Blick in die Welt. c’t 2009, Heft 20. 122- 129.
- [BKLP04] D. A. Bowman, E. Kruijff, J. J. J. Laviola und I. Poupyrev: 3D User Interfaces: Theory and Practice. Addison-Wesley Professional, 2004.
- [BLB03] S. Beckhaus, F. Ledermann und O. Bimber: Storytelling and Content presentation with Virtual and Augmented Environments in a Museum Context. In: Proceedings of CIDOC 2003, CIDOC, 2003.
- [BOH+08] C. Bichlmeier, B. Ockert, S.-M. Heining, A. Ahmadi und N. Navab: Stepping into the Operating Theater: ARAV - Augmented Reality Aided Vertebroplasty. In: 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Seiten 165–166, 2008.
- [Bör04] Z. K. Böröcz: Optische Erfassung und numerische Analyse von Kontakten in der dynamischen Okklusion mittels digitalisierter Simulationsmodelle, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Dissertation, 2004.

- 
- [BR05] O. Bimber und R. Raskar: Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds. A. K. Peters, Ltd., 2005. ISBN 978-1568812304.
- [BR98] F. A. Biocca und J. P. Rolland: Virtual Eyes Can Rearrange Your Body: Adaptation to Visual Displacement in See-Through, Head-Mounted Displays. Presence: Teleoper. Virtual Environ., 7(3):262–277, 1998.
- [BS06] H.-J. Bullinger und W. Schweizer: Intelligent production-competition strategies for producing enterprises. In: International Journal of Production Research, Volume 44, Issue 18 & 19 September 2006 , Seiten 3575 – 3584.
- [BSC06] D. G. Brown, R. Stripling und J. T. Coyne: Augmented Reality for Urban Skills Training. In: Proceedings of the IEEE Virtual Reality 2006 Conference, Seiten 12–15, 2006.
- [BTG06] H. Bay, T. Tuytelaars und L. Van Gool: SURF: Speeded Up Robust Features. In 9th European Conference on Computer Vision, Graz Austria, May 2006.
- [BTP08] C. Bade, J. Tümmler und G. Paul: Stationary and Mobile Augmented Reality in Industrial Applications. In: Proceedings of the International Conference on Information Technologies (InfoTech2008). Sofia, Bulgaria: Publishing Hous "King" 2008. – ISBN 978-954-9518-56-6, S. 213-222.
- [Bul95] H.-J. Bullinger: Arbeitsgestaltung: Personalorientierte Gestaltung marktgerechter Arbeitssysteme. Stuttgart: Teubner, 1995.
- [BVD+04] H. Burr, M. Vielhaber, T. Deubel, C. Weber und S. Haasis: CAx/EDM-integration – enabler for methodological benefits in the design process. In: Konferenz- Einzelbericht DESIGN 2004 – International Design Conference, The Design Society, Dubrovnik, 2004, S. 833-840.
- [BWB99] B. Thomas, W. Piekarski und B. Gunther: Using Augmented Reality to Visualise Architecture Designs in an Outdoor Environment. In: International Journal of Design Computing: Special Issue on Design, 1999.
- [BWG11] U. Bracht, S. Wenzel und D. Geckler: Digitale Fabrik: Methoden Und Praxisbeispiele. ISBN 3540890386, Verlag Springer, 2011.

- [CAP11] Capture 3D - 3D INDUSTRIAL MEASUREMENT SOLUTIONS, 2011, Webseite: <http://www.capture3d.com/applications-quality-turbines-offshore-windturbine.html>, Stand 13.02.2011
- [CFA+11] J. Carmigniani, B. Furht, M. Anisetti, P. Ceravolo, E. Damiani und M. Ivkovic: Augmented reality technologies, systems and applications. In: Multimedia Tools and Applications (2011) Vol. 51, Seiten 341–377, Springer Science+Business Media, DOI 10.1007/s11042-010-0660-6.
- [CGW09] K. Chuls, W. Ganz und P. Warnke (Hrsg.): Foresight Prozess im Auftrag des BMBF – Zukunftsfelder neuen Zuschnitts, Fraunhofer ISI und IAO, ISI Publica.
- [CHS+08] T. Chang, T. Hong, M. Shneier, G. Holguin, J. Park und R. D. Eastman: Dynamic 6DOF metrology for evaluating a visual servoing system. In: Proceedings of the 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS '08), ISBN: 978-1-60558-293-1, New York, NY, USA 2008.
- [CGKM07] R. O. Castle, D. J. Gawley, G. Klein und D. W. Murray: Towards simultaneous recognition, localization and mapping for hand-held and wearable cameras. In: Proc. International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italy, April 10-14, 2007, pages 4102–4107, 2007.
- [CKM08] R. O. Castle, G. Klein und D. W. Murray: Video-rate localization in multiple maps for wearable augmented reality. In: Proc 12th IEEE Int Symp on Wearable Computers, Pittsburgh PA, Sept 28 - Oct 1, 2008, pages 15–22, 2008.
- [Cla06] S. Clarke: Telepräsenz: München-Australien - Fernsteuerung über reale Netzwerke. In: Hoffmann, H.; Reinhart, G.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Münchener Kolloquium 2006: Zukunft Voraus – Denken für den Standort Deutschland. 2006, S. 263-264.
- [Cla09] P. Claussen: Digitale Fabrik - Virtualität in realer Umgebung. In: Tagungsband »Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme 6. Fachtagung zur Virtual Reality« 12. IFF-Wissenschaftstage, 16.-18. Juni 2009, Magdeburg, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, ISBN 978-3-8396-0023-8; Seiten 25-38.

- 
- [CM92] T. Caudell und David Mizell: Augmented Reality – An Application of Heads-Up Display Technology. In: Hawaii International Conference on Systems Science: Proceedings IEEE Press, S. 659-669, Kauai, Hawaii 1992.
- [CSW99] K. Chung, J. Shewchuck und R. Williges: An Application of Augmented Reality Thickness Inspection. In: Human Factors and Ergonomics in Manufacturing, S. 311-342, Vol. 9 1999.
- [DA06] B. Denkena und C. Ammermann: Analyse und Potenziale des Anlagenanlaufs in der Großserienfertigung. Vortrag im Rahmen des BMBF-Projekts „Ramp-Up/2“, Frankfurt, 2006.
- [Dan99] W. Dangelmaier: Fertigungsplanung – Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung. Springer Verlag, Berlin 1999.
- [DCV05] U. Dombrowski, I. Crespo und H. Vollrath: Effektive und effiziente logistische Prozesse durch den Einsatz von RFID-Technologie. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 4, S. 248-253.
- [Dem07] W. Demtröder: Laserspektroskopie: Grundlagen und Techniken. Springer, Berlin; Auflage: 5., erweiterte und neu bearbeitete Auflage. (17. Juli 2007), 978-3540337928.
- [DES09] DESCAM 3D Technologies GmbH, 2009, Webseite, Scriba, S.: [http://www.descam.de/glossar/soll---ist-vergleich\\_\\_39.htm](http://www.descam.de/glossar/soll---ist-vergleich__39.htm), Stand 05.10.09
- [DGB08] A. Dünser, R. Grasset und M. Billingham: A survey of evaluation techniques used in augmented reality studies. Singapore: ACM SIGGRAPH ASIA 2008 courses, 11-13 December. 1-27.
- [DIN1319] DIN 1319 Teil 1, Ausgabe Januar 1995 Titel: „Grundlagen der Messtechnik“ – Grundbegriffe – Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth-Verlag GmbH, Berlin-Wien-Zürich.
- [DIN19226] DIN 19226-1: Regelungstechnik und Steuerungstechnik, Begriffe und Benennungen.
- [DIN6385] DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen, DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Beuth-Verlag GmbH, 2004.

- [Doi03] F. Doil: Augmented Reality gestützte Fabrik- und Anlagenplanung, Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Fachbereich Maschinenbau, Diplomarbeit, 2003.
- [Dos08] S. Dohse: Analyse und Bewertung von Trackingsystemen für den industriellen Einsatz im Bereich der Augmented Reality. Studienarbeit. Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Juni 2008.
- [DWB06] H. Durrant-Whyte und T. Bailey: Simultaneous localization and mapping: part I The essential algorithms. IEEE Robotics & Automation Magazine, 13(2):99–110, June 2006.
- [EHG10] M. Eigner, S. Handschuh und F. Gerhardt: Concept to Enrichen Lightweight, Neutral Data Formats with CAD-based Feature Technology. In: Computer-Aided Design and applications. Issue 7, 2010, Pages 89-99.
- [Ema08] eMagin Corporation. “eMagin: Making Virtual Imaging a Reality”. <http://www.emagin.com>, 2008.
- [EMPT96] W. Eversheim, W. Maßberg, G. Pritschow und H. K. Tönshoff: Prozeßgestaltung. In: Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management – Betriebshütte Teil 1. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 7-73 - 77-123.
- [ES01] M. Eigner und R. Stelzer: Produktdatenmanagement-Systeme. Springer Verlag Berlin 2001.
- [EWJ+01] W. Eversheim, M. Weck, D. Jahn, M. Koschig und I. Fricker: Augmented Reality-Technologie unterstützt manuelle Montage. in: VDI-Z 143 (2001) 9, 2001.
- [FAR09] FARO. “FARO Europe GmbH & Co. KG”. <http://www.faro.com>, 2009.
- [FBB09] D. W. Fellner, J. Behr und U. Bockholt: instantreality - A Framework for Industrial Augmented and Virtual Reality Applications. In: The 2nd Sino-German Workshop "Virtual Reality & Augmented Reality in Industry": Invited Paper Proceedings. Participants Edition. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, pp. 78-83, 2009.

- 
- [FDB08] Z. Feng, H.B.-L. Duh und M. Billinghurst: Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction and Display: A Review of Ten Years of ISMAR. In: Proceedings of ISMAR 2008: 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. ISBN: 978-1-4244-2840-3, Seiten 193-202, Cambridge 2008.
- [FMS93] S. Feiner, B. Macintyre und D. Seligmann: Knowledge-Based Augmented Reality. In: Communications of the ACM: Vol. 36, 7/1993.
- [FRG+10] M. Friedewald, O. Raabe, P. Georgieff, D.-J. Koch und P. Neuhäusler: Ubiquitäres Computing. Das »Internet der Dinge« – Grundlagen, Anwendungen, Folgen. In: Studien des Büros für Technikfolgen-Abschätzung, Bd. 31. ISBN: 978-3-8360-8131-3. 2010.
- [Fri04] W. Friedrich: BMBF-Leitprojekt ARVIKA, Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service, 7/1999-6/2003, [www.arvika.de](http://www.arvika.de), ARVIKA, Publicis Verlag, ISBN 3-89578-239-4, 2003.
- [FS09] A. Fritsch und V. Schölzke: Nutzen von virtueller Inbetriebnahme im Anlagenbau. In: Tagungsband »Digitale Fabrik @ Produktion – Zwei Welten wachsen zusammen « 5. internationaler Fachkongress, Automobil Produktion, 23. und 24. Juni 2009, München.
- [FW06] W. Friedrich und W. Wohlgemuth: BMBF-Leitprojekt ARTESAS: Advanced Augmented Reality Technologies for Industrial Service Applications, 2/2004-6/2006, [www.artesas.de](http://www.artesas.de), Schlussbericht zum Fördervorhaben 01 IR C02 “ARTESAS - Advanced Augmented Reality Technologies for Industrial Service Applications”, TIB Hannover, 2006.
- [Gel07] D. Gelder: Whitepaper: Developing Augmented Reality Applications with the Unifeye SDK® from Metaio. Metaio GmbH. V 3.0 – 11/29/2007.
- [GK06] M. Gorriz und M. Kuduz: IT zur Absicherung der Produktionsqualität. In: Innovationen durch IT. S 207-219. ISBN: 978-3-540-34843-6, Springer Berlin Heidelberg. 2006.

- [GLRW00] J. Gausemeier, U. Lindemann, G. Reinhart und H.-P. Wiendahl: Kooperatives Produktengineering – ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 2000. (HNI-Verlagsschriftenreihe; Band 79)
- [God02] R. Godding: Geometrical Calibration and Orientation of Digital Imaging Systems, AICON GmbH, Germany, 2002.
- [Gol04] K. Goldschmidt: Entwicklung eines Konzeptes für die flächendeckende Einführung der Digitalen Fabrik am Beispiel der Produktionsplanung der Volkswagen AG. Clausthal, Technische Universität, Wirtschaftsingenieurwesen, Diplomarbeit, 2004.
- [Gre01] K. Grether: Konzeption und Entwurf eines technischen Systems zur entwurfbezogenen-planerischen Bearbeitung von Bauwerken im Bestand, Diplomarbeit, Fakultät Architektur, Stadt- und Regionalplanung, Bauhaus Universität Weimar, Oktober 2001.
- [Gru09] C.-G. Grundig: Fabrikplanung: Planungssystematik – Methoden – Anwendungen. 3., neu bearbeitete Auflage, Hanser Verlag, München 2009. ISBN: 978-3-446-41411-2.
- [GSB+07] P. Georgel, P. Schroeder, S. Benhimane, S. Hinterstoisser, M. Appel und N. Navab: An Industrial Augmented Reality Solution For Discrepancy Check. In: Sixth International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR07), p. 111 - 114. IEEE and ACM, Nara, Japan. 2007 - ISBN 978-1-4244-1749-0.
- [HBD09] A. Hoffmeyer, C. Bade und F. Doil: Konzept zur Realisierung einer Augmented-Reality-gestützten Bau- und Layoutplanung mit Hilfe eines laserbasierten Large-Area-Trackings. In: Tagungsband »Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme 6. Fachtagung zur Virtual Reality« 12. IFF-Wissenschaftstage, 16.-18. Juni 2009, Magdeburg, Fraunhofer IFF, ISBN 978-3-8396-0023-8; Seiten 311-322.
- [HBT07] M. Haller, M. Billinghamurst und B. H. Thomas: Emerging technologies of augmented reality: interfaces and design. Idea Group Publishing, Hershey PA 17033, USA, 2007. ISBN: 978-1599040660, S. 15.

- 
- [HF04] T. Höllerer und S. Feiner: Mobile augmented reality. In: Telegeoinformatics: Location-Based Computing and Services (Karimi, H., A. Hammad). Taylor and Francis Books Ltd., London, 2004.
- [HGB+01] H. Hua, C. Gao, L. Brown, N. Ahuja und J. Rolland: Using a Head-Mounted Projective Display in Interactive Augmented Environments. In: IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality 2001, pp. 217–223, 2001.
- [Hir08] M. Hirzel: Erfolgsfaktor Prozessmanagement. In: Prozessmanagement in der Praxis. M. Hirzel, F. Kühn, I. Gaida (Hrsg.), Gabler Verlag, ISBN: 978-3-8349-9436-3 , Seiten 11 – 22.
- [Höh06] W. Höhl: Augmented Reality (AR) Welche Potenziale gibt es für die Architekturvisualisierung? In: Cad/Visualisierung, S. 12-15, München, Ausgabe 1/2006.
- [HR02] M. Haringer und H. Regenbrecht: A Pragmatic Approach to Augmented Reality Authoring. In: Int. Symposium on Mixed and Augmented Reality Proceedings (ISMAR), Darmstadt 2002.
- [HZ03] R. Hartley und A. Zisserman: Multiple View Geometry. Cambridge University Press, 2003.
- [JBL+00] S. Julier, Y. Baillot, M. Lanzagorta, D. Brown und L. Rosenblum: BARS: Battlefield Augmented Reality System. In: In NATO Symposium on Information Processing Techniques for Military Systems, Seiten 9–11, 2000.
- [JMS11] E. Jundt, C. Menk und W. Schreiber: Projection-based Augmented Reality im Service-Training. In Tagungsband: *Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung*. HNI-Schriftenreihe, J. Gausemeier, M. Grafe, F.-M. a.d. Heide – ISBN: 978-3-942647-14-4. Paderborn, Germany, 2011.
- [Jur04] M. Juretzko: Reflektorlose Video-Tachymetrie – ein integrales Verfahren zur Erfassung geometrischer und visueller Informationen. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 2004.

- [Jur07] M. Juretzko: Untersuchung zur Wiederholgenauigkeit eines geregelten Winkelmesssystems am Beispiel eines Lasertrackers LTD 500. Brunner, F. (Hrsg): Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, 19.-20.04.2007, S. 181-186.
- [Kau04] H. Kaufmann: Geometry Education with Augmented Reality. PhD thesis, Vienna University of Technology, 2004.
- [KB99] H. Kato und M. Billinghurst: Marker Tracking and HMD Calibration for a Video-based Augmented Reality Conferencing System. In: In Proceedings of the 2nd International Workshop on Augmented Reality (IWAR 99). October, San Francisco, USA, 1999.
- [KB09] S. Kahn und U. Bockholt: 3-D-Rekonstruktion mit einer Tiefenkamera für industrielle Augmented-Reality-Anwendungen. In: Tagungsband 12. IFF-Wissenschaftstage - Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme / 6. Fachtagung zur Virtual Reality. Magdeburg, 2009. S. 105-112, ISBN 978-3-8396-0023-8.
- [Ker03] F. Kern: Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, 2003, Nr. 19.
- [KFG02] H. Krallmann und H. Frank: Systemanalyse im Unternehmen. Oldenbourg Wissensch.Vlg; Auflage: 4., ISBN 978-3486272031, 2002.
- [Kie07] J. Kiefer: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Dissertation. In: Schriftenreihe Produktionstechnik, Band 43, Universität des Saarlandes 2007, ISBN 978-3-930429-72-1.
- [Kle06] B. Klein: Toleranzmanagement im Maschinen- und Fahrzeugbau. Oldenbourg Verlag, München 2006.
- [KM07] G. Klein und D. Murray: Parallel tracking and mapping for small AR workspaces. In: Proc. Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'07), Nara, Japan, November 2007.

- 
- [KS07] M. Klopschitz und D. Schmalstieg: Automatic reconstruction of wide-area fiducial marker models. In: ISMAR '07: Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pages 1–4, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society.
- [KTH+07] T. Klein, J. Traub, H. Hautmann, A. Ahmadian und N. Navab: Fiducial-Free Registration Procedure for Navigated Bronchoscopy. In: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), Brisbane, Australia, 2007.
- [KP10] D.W.F. van Krevelen und R. Poelman: A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. In: The International Journal of Virtual Reality, 2010, 9(2), Seiten 1-20.
- [Küh06] W. Kühn: Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner. Hanser Verlag, München 2006.
- [Kyl05] S. Kyle: Large-Scale Metrology. In: Handbook of Measuring System Design, 2005, Wiley Online Library.
- [LBS00] M. Lewin, R. Bowden und M. Sarhadi: Automotive Prototyping using Augmented Reality. In: Proceedings of the 7th UK VR-SIG Conference, S. 11 – 20, Glasgow 2000.
- [LGK99] T. M. Lehmann, C. Gonner und K. Spitzer: Survey: interpolation methods in medical image processing. IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 18, No. 11, pp. 1049–1075, 1999.
- [Low99] D. G. Lowe: Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. Computer Vision, IEEE International Conference on, 2:1150–1157 vol.2, August 1999.
- [LR05] C. Ludwig und C. Reimann: Augmented Reality: Information im Fokus. In: C-LAB Report. Vol. 4 (2005) No. 1, ISSN 1619-7879, Universität Paderborn, 2005.
- [LRJ+02] M. A. Livingston, L. J. Rosenblum, S. J. Julier, D. Brown, Y. Baillot, J. E. S. II, J. L. Gabbard und D. Hix: An Augmented Reality System for Military Operations in Urban Terrain. In: Interservice/Industry Training, Simulation and Education Conference (I/IT SEC), 2002.

- [Luh03] T. Luhmann: Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Wichmann, Heidelberg, 2003.
- [LW03] V. Lalioti und A. Woolard: Mixed reality production of the future. In: International Broadcasting Convention (IBC) 2003, pp. 314–320, Amsterdam, 2003.
- [Mad01] G. T. Mader: Vergleich händischer und rechnergestützter Verfahren: Anwendung, Wirtschaftlichkeit. In: Weferling, U. et al. (Hrsg.): Von Handaufmaß bis High Tech, Kolloquium an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Verlag Philipp von Zabern, Mainz, 2001, S. 99-110.
- [Mah00] S. Mahlitz: Messtechnik, Vorlesungsskript, Berufsakademie Berlin, 2000.
- [Mal00] J. Mallon: Untersuchung kontinuierlicher Produktivitätsveränderungen in der Neuen Fabrik, Fortschrittsberichte VDI, Reihe 2, Nr. 551, VDI Verlag, 2000.
- [Man09] F. Mantwill: Die Digitale Fabrik muss mehr als nur Planen und Absichern können. In: Tagungsband »Digitale Fabrik @ Produktion – Zwei Welten wachsen zusammen « 5. internationaler Fachkongress, Automobil Produktion, 23. und 24. Juni 2009, München
- [met09] Metaio GmbH: interne Dokumente, Sceenshots aus Unifeye, 2009. [www.metaio.com](http://www.metaio.com).
- [MFA09] N. Muhammad, D. Fofi und S. Ainouz: Current state-of-the-art of vision-based slam, january 2009.
- [MGB+03] B. Macintyre, M. Gandy, J. Bolter, S. Dow und B. Hannigan: DART: The Designer's Augmented Reality Toolkit. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IEEE and ACM International: Symposium on Mixed and Augmented Reality Gvu Center, Georgia Institute of Technology, ISMAR '03/IEEE 2003.
- [MGDB04] B. Macintyre, M. Gandy, S. Dow und J. D. Bolter: DART: A Toolkit for Rapid Design Exploration of Augmented Reality Experience, in: UIST 04, October 24-27, 2004: Santa Fe, New Mexico/USA Gvu Center, Georgia Institute of Technology, ACM 2004.
- [Miz01] D. Mizell: Boeing's wire bundle assembly project. In: Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality., p. 447 - 467. Lawrence Earlbaum Associates, 2001.

- 
- [MK94] P. Milgram und F. Kishino: A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. IEICE Transactions on Information Systems, Vol. E77-D, No. 12, Dezember 1994.
- [MLS+00] S. Müller, S. Lehmann, D. Stricker, Y. Genc und N. Navab: Tracking Technologies and Roadmap for ARVIKA. Fraunhofer Gesellschaft für grafische Datenverarbeitung, Darmstadt, 2000.
- [MPS09] Metro Paris Subway: application available at apples I-Store, Internetquelle: [http://www.metroparisiphone.com/index\\_en.html](http://www.metroparisiphone.com/index_en.html), Stand: 23.10.2009.
- [Mul94] A. Mulder: Human movement tracking technology". Tech. Rep., Simon Fraser University, School of Kinesiology, 1994.
- [NC96] U. Neumann und Y. Cho: A self-tracking augmented reality system. In: ACM Symposium on Virtual Reality and Applications: Proceedings IEEE Press, S. 109-115, New York 1996.
- [NEK94] P. Nyhuis, A. Elscher und M. Kolakowski: Prozessmodell der Synergetischen Fabrikplanung – Ganzheitliche Integration von Prozess- und Raumsicht. In: Wekstattstechnik online, Heft 4, 1994.
- [Nit76] J. R. Nitsch: Die Eigenzustandsskala - Ein Verfahren zur hierarchisch-mehrdimensionalen Befindlichkeitsskalierung. In: J.R. Nitsch, I. U. (Hrsg.): Beanspruchung im Sport. Beiträge zur psychologischen Analyse sportlicher Leistungssituationen. Bad Homburg, Germany: Limpert, 1976, S. 81-102.
- [NK06] S. Noelle und G. Klinker: Augmented Reality as a Comparison Tool in Automotive Industry. In: ISMAR06, pages 249–250, USA, 2006.
- [Nöl02] S. Noelle: Stereo Augmentation of Simulation Results on a Projection Wall by Combining two Basic ARVIKA Systems. In: ISMAR02, Germany, 2002.
- [NRC09] Nokia Research Center (NRC): Mobile Mixed Reality - The Vision. In: Nokia Technology Insights series, Juni 2009.
- [NS02] R. Nägele und P. Schreiner: Geschäftsprozessorientiertes Wissensmanagement. In: Abecker, A.; Hinkelmann, K.; Maus, H.; Müller, H. J. (Hrsg.): Geschäftsprozessorientiertes Wissensmanagement. Springer Verlag, Berlin 2002, S. 25-46.

- [Nür08] A. Nürnberger: Synchrones Abbild der realen Fabrik - Rückdokumentation, Meilensteinbericht M1: Screeningphase. Kompetenzbereich Produktionssysteme und Informationsprozesse - Digitale Planung und Produktion/Logistik, INPRO, Berlin, Januar 2008.
- [Ose08] R. Osebold: Erfassung, Analyse und Vermeidung von geometrischen Imperfektionen bei Vortriebsrohren. Kurzbericht für Ministerium für Umwelt und Naturschutz, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Baubetrieb und Projektmanagement, im September 2008.
- [OYN08] S.K. Ong, M.L. Yuan and A.Y.C. Nee, Augmented reality applications in manufacturing: a survey. In: International Journal of Production Research, Vol. 46, No. 10, pp. 2707–2742, 2008.
- [Pau91] G. Paul: CIM-Basiswissen für die Betriebspraxis. Vieweg Verlag, Braunschweig 1991.
- [PBDM07] K. Pentenrieder, C. Bade, F. Doil und P. Meier: Augmented Reality-based factory planning - an application tailored to industrial needs. In: Proceedings of the Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2007). Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2007 - ISBN 978-1-4244-1749-0.
- [PBFG05] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen und K.-H. Grote: Konstruktionslehre. 6. Aufl. Springer Verlag, Berlin 2005.
- [PBFN07] N. Padoy, T. Blum, H. Feussner und N. Navab: Towards Automatic Surgical Workflow Analysis: Method and Application. In: 6. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie (CURAC 2007), Karlsruhe, Germany, October 2007.
- [PBR+08] K. Pentenrieder, C. Bade, D. Richter, F. Doil und G. Klinker: Evaluation of Registration Approaches for Industrial Augmented Reality. In: Virtual Reality in Industry and Society: From Research to Application (5th INTUITION), 6-8 October 2008, Turin, Italy. ISBN 978-960-89028- 7-9.
- [Pen08] K. Pentenrieder: Augmented Reality based Factory Planning. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl für Informatikanwendungen in der Medizin und Augmented Reality, München, 2008.

- 
- [Pis06] L. Pischke: Leitsysteme als Schlüsselkomponente moderner Manufacturing Execution Systems (MES). In: Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart: Stuttgarter Impulse – Fertigungstechnik für die Zukunft, Stuttgart 2006.
- [PL07] J. Platonov und M. Langer: “Automatic contour model creation out of polygonal CAD models for markerless Augmented Reality”. In: Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 2007.
- [PLC01] F. Persiani, A. Liverani und F. de Crescenzo: Augmented Reality Approach to Vehicle Prototyping, IIEC, Amman, Jordan 2001.
- [PNY+05] Y. Pang, Andrew Y. C. Nee, Kamal Youcef-Toumi, S. K. Ong und M. L. Yuan: Assembly Design and Evaluation in an Augmented Reality Environment. Innovation in Manufacturing Systems and Technology, 2005.
- [Pra91] W. K. Pratt: Digital Image Processing. John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [PST04] W. Piekarski, R. Smith und B. H. Thomas: Designing Backpacks for High Fidelity Mobile Outdoor Augmented Reality. In: Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Seiten 280– 281, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [PT01] W. Piekarski und B. H. Thomas: Tinmith-evo5 - An Architecture for Supporting Mobile Augmented Reality Environments. In: 2nd Int'l Symposium on Augmented Reality, S. 177-178, New York, NY, Oct 2001.
- [PTB+01] I. Poupyrev, D. Tan, M. Billingham, H. Kato und H. Regenbrecht: Tiles: A Mixed Reality Authoring Interface. In: INTERACT 2001, Yokohama: Proceedings IEEE Press, New York 2001.
- [Puh90] J. Puh-Westerheide: Beschaffung und Abwicklung komplexer Montageanlagen – ein Erfahrungsbericht, VDI Berichte Nr. 871, 1990, S. 15-41.
- [RBB+03] R. Raskar, J. Baar, P. Beardsley, T. Willwacher, S. Rao und C. Forlines: iLamps: geometrically aware and self-configuring projectors. SIGGRAPH '03: ACM SIGGRAPH 2003 Papers, pp. 809–818, 2003.

- [RBK05] A. Ritter, S. Bierschenk und T. Kuhlmann: IPA - Stand der Digitalen Fabrik bei kleinen und mittelständischen Unternehmen, Fraunhofer IRB-Verlag, 2005, ISBN 3-8167-6725-7.
- [RDB00] J. Rolland, L. Davis und Y. Baillot: Augmented Reality and Wearable Computers, Chap. A survey of Tracking Technology for Virtual Environments. Lawrence Erlbaum Press, Mahwah, NJ, 2000.
- [Reg06] H. Regenbrecht: Industrial Augmented Reality Applications. In: Emerging Technologies of Augmented Reality: Interfaces & Design (Haller, Thomas & Billingham), S. 283 – 304. Idea Group Publishers, Hershey/PA, USA. 2006.
- [Reh11] T. Rehder: Vom Internet zum Outernet – das Web springt auf die Straße. In: Leitfaden Online Marketing - Band 2, Torsten Schwarz (Hrsg.), S 815 - 824. ISBN-10: 3000327983. September 2011.
- [Rei99] G. Reinhart: Simulation – ein Experiment am digitalen Modell. In: Feldmann, K.; Reinhart, G. (Hrsg.): Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion. Springer Verlag, Berlin 1999, S. 13-30.
- [RJM+07] M. Ranzinger, S. Junghanns, E. Mendez, G. Schall und D. Schmalstieg: Augmented Reality in der Leitungsdokumentation. 12. Münchner Fortbildungsseminar Geoinformationssysteme, 2007. München.
- [RMBK03] T. Reicher, A. MacWilliams, B. Brügge und G. Klinker: Results of a study on software architectures for Augmented Reality systems. In: International Symposium on Augmented and Mixed Reality (ISMAR) 2003, 2003.
- [Roh07] M. Rohs: Marker-Based Embodied Interaction for Handheld Augmented Reality Games. In: Journal of Virtual Reality and Broadcasting, Volume 4, 2007, no. 5, ISSN 1860-2037.
- [RSKM99] D. Reiners, D. Stricker, G. Klinker, und S. Müller: Augmented Reality for Construction Tasks: Doorlock Assembly. In: Behringer, R., Klinker, G., Mizell, D.: Augmented Reality – Placing Artificial Objects, A. K. Peters, Natick, S. 47- 60, MA 1999.

- 
- [RT08] J. Rippe und J. Tholen: Beschäftigung und Verflechtungsbeziehungen der Automobilindustrie und ihrer Zulieferer. Abschlussbericht. Universität Bremen-IAW, Hans-Böckler-Stiftung Düsseldorf und der Arbeitnehmerkammer Bremen, 2008.
- [SB05] R. D. Schraft und S. Bierschenk: Digitale Fabrik und ihre Vernetzung mit der realen Fabrik. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF) 100 (2005) 1-2, S. 14-18.
- [SB07] A. Schmeil und W. Broll: MARA - A Mobile Augmented Reality-Based Virtual Assistant. In: IEEE Virtual Reality Conference 07, Seiten 267–270, 2007.
- [SBLM09] J. Schütze, H. Baum, M. Laue und E. Müller: Analysis of Interpersonal Communication Processes in Digital Factory Environments. IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2009, Volume 307/2009, Seiten 177-184.
- [SBR09] A. Spillner, U. Bracht und H. Röhl: Umsetzungsstand der Digitalen Fabrik - Ergebnisse einer Umfrage zur Fabrikplanung bei großen deutschen Automobilherstellern. In: Tagungsband 12. IFF-Wissenschaftstage - Digitales Engineering zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme / 6. Fachtagung zur Virtual Reality. Magdeburg, 2009. ISBN 978-3-8396-0023-8.
- [SBTM06] S. Sauer, D. Berndt, J. Tümler und R. Mecke: Modellbasierte Vollständigkeitsprüfung bei Montageprozessen. In: Leistungen und Ergebnisse - Jahresbericht 2006, Fraunhofer IFF Magdeburg, Seiten 64 - 65, 2006.
- [Sch01] M. Scherer: Objekterfassung: Was? – Wie? – Wozu? Eine Analyse mit Schwerpunkt bei der Bauaufnahme. In: Flächenmanagement und Bodenordnung. 4/2001 S. 188-199.
- [Sch07] R. J. Schack: Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik. Dissertation, TU München 2007.
- [Sch08] W. Schreiber: Das Bindeglied zwischen digitaler und realer Fabrik - Augmented Reality als effizientes Werkzeug für den Soll-Ist-Vergleich in der Planung. In: Zeitschriftenreihe Intelligenter Produzieren; VDMA-Verlag, Heft 2 2008, Seite 8-10.

- [Sch08a] W. Schreiber: Angewandte virtuelle Technologien im Produkt- und Produktionsmittellebenszyklus AVILUS. In: Tagungsband der 11. IFF Wissenschaftstage: Virtual Reality und Augmented Reality zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme. VR und AR - Automotive, Seiten 133–140, 2008.
- [Sch08b] M. Schwarz: Glossar von Controlling & Rechnungswesen der Volkswagen AR, Definition: Soll/Ist-Vergleich, Volkswagen, Intranet, Stand 15.06.2009.
- [Sch09] W. Schlögl: Digital Factory 2.0 – Working in the Digital Factory like in the shop floor. In: Tagungsband »Digitale Fabrik @ Produktion – Zwei Welten wachsen zusammen « 5. internationaler Fachkongress, Automobil Produktion, 23. und 24. Juni 2009, München
- [Sch95] H. Schmigalla: Fabrikplanung – Begriffe und Zusammenhänge. Hanser Verlag, München, 1995.
- [Sch99] J. Schöttner: Produktdatenmanagement in der Fertigungsindustrie. Hanser Verlag, München 1999.
- [SCHB01] G. Stetten, V. Chib, D. Hildebrand und J. Bursee: Real Time Tomographic Reflection: Phantoms for Calibration and Biopsy. IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, Vol. 00, p. 11, 2001.
- [SD05] W. Schreiber und F. Doil: Augmented Reality - eine Schnittstelle zwischen der realen und virtuellen Fabrik. In: 8. IFF Wissenschaftstage, Magdeburg, 2005.
- [SD07] S. Sauer und L. Dornheim: Modellbasierte, optische Prüfung der Vollständigkeit von montierten Bauteilen. In: 10te Wissenschaftstage. Fraunhofer IFF Magdeburg, Germany, 2007.
- [SFH+02] D. Schmalstieg, A. Fuhrmann, G. Hesina, Z. Szalavari, L. M. Encarnacao, M. Gervautz und W. Purgathofer: The Studierstube Augmented Reality Project. Technical Report, 2002.
- [SK97] G. Spur und F.-L. Krause: Das virtuelle Produkt – Management der CAD-Technik. Hanser Verlag, München 1997.

- 
- [SKWS07] P. Siltanen, T. Karhela, C. Woodward und P. Savioja: AR for Plant Lifecycle Management. In: International Conference on Concurrent Enterprising ICE. Sophia. Antropolis, Frankreich, 2007.
- [SLW02] R. C. Splechtna, A. L. Fuhrmann und R. Wegenkittl: ARAS - Augmented Reality Aided Surgery System Description. Technischer Bericht, VRVis Research Center, Austria, www.vrvis.at, 2002. TR-VRVis-2002-040.
- [SM04] D. Schneider und G.-H. Maas: Development and application of an extended geometrical model for high resolution panoramic cameras. In: XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, Geo-Imagery Bridging Continents pp. 366-371.
- [SM11] F. Scheer und S. Müller: Large area indoor tracking for industrial augmented reality. In: Proceedings of 9th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Seiten 269 – 270, Seoul 2010, ISBN: 978-1-4244-9343-2.
- [SMP06] M. Scheuchl, D. Motus und G. Paul: Mit kontinuierlicher Verbesserung zum besten Prozess, Effizienzorientierte Montage. In: Produktionsmanagement. Sonderteil Management. VDI-Z 148 (2006), Nr.7/8 - Juli/August, S. 38-40.
- [SRG09] M. Schenk, D. Reh und J. von Garrel: Industrielle Dienstleistungen und Internationalisierung. In: Fabrikplanung. M. Schenk und C. M. Schlick (Hrsg.), DOI: 10.1007/978-3-8349-8794-5\_2, Gabler | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2009.
- [SRM+07] G. Schall, B. Reitinger, E. Mendez, S. Junghanns und D. Schmalstieg: Handheld Geospatial Augmented Reality Using Urban 3D Models. In: Proceedings of the Workshop on Mobile Spatial Interaction, ACM International Conference on Human Factors in CS, 2007.
- [SS07] M. Sareika und D. Schmalstieg: Urban Sketcher: Mixed Reality on Site for Urban Planning and Architecture. In: Proceedings of the Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2007). Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, S. 27-30, 2007 - ISBN 978-1-4244-1749-0.

- [SSS09] M. Schenk, M. Schumann und W. Schreiber: Die Innovationsallianz Virtuelle Techniken - ein Beitrag zum Virtual Engineering am Standort Deutschland, 8. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung. Paderborn, Germany, 2009.
- [ST07] S. Sauer und J. Tümler: Ein Assistenzsystem zur Verbesserung von Montageprozessen. In: Forschung vernetzen, Innovationen beschleunigen - wissenschaftliches Kolloquium. Fraunhofer IFF Magdeburg, Germany, 2007. ISBN 978-3-8167-7557-7.
- [Sta73] H. Stachowiak: Allgemeine Modelltheorie. Wien 1973, ISBN 3-211-81106-0.
- [SW04] M. Schenk und S. Wirth: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb, 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004.
- [SW07] D. Schmalstieg und D. Wagner: Experiences with Handheld Augmented Reality. In: Proceedings of the Sixth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2007). Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2007 - ISBN 978-1-4244-1749-0.
- [SZ11] W. Schreiber und P. Zimmermann: Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld. Das AVILUS-Projekt – Technologien und Anwendungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011. ISBN: 978-3-642-20635-1.
- [TCG+08] G. Takacs, V. Chandrasekhar, N. Gelfand, Y. Xiong, W. C. Chen, T. Bispigiannis, R. Grzeszczuk, K. Pulli und B. Girod: Outdoors augmented reality on mobile phone using loxel-based visual feature organization. In: Proceeding of the 1st ACM international conference on Multimedia information retrieval, Seiten 427–434, New York, NY, 2008.
- [Teg06] A. Tegtmeier: Augmented Reality als Anwendungstechnologie in der Automobilindustrie, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, Dissertation, 2006.
- [Tho03] B. H. Thomas: Challenges of Making Outdoor Augmented Reality Games. In: Proceedings: 2nd CREST Workshop on Advanced Computing and Communicating Techniques for Wearable Information Playing. Nara, Japan, May 2003.

- 
- [Tho07] G. A. Thomas: Mixed Reality Techniques for TV and their application for On-Set and Pre-Visualization in Film Production. Tech. Rep. 145, BBC Research, 2007.
- [TI09] Total Immersion - Augmented Reality Solutions. <http://www.t-immersion.com>. 24.07.2009.
- [TN03] M. Träskbäck und M. Nieminen: Requirements for Using Mixed Reality in Museums. In: First Research Workshop on Augmented Virtual Reality. AVIR 2003. University of Geneva, Switzerland September 18-19, 2003.
- [TOBM03] A. Tang, C. Owen, F. Biocca und W. Mou: Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly. In: CHI '03: Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, Seiten 73–80, New York, NY, USA, 2003. ACM Press.
- [TRM+08] J. Tümler, A. Roggentin, R. Mecke, F. Doil, A. Huckauf, M. U. Urbina, E. A. Pfister und I. Böckelmann: Subjektive Beanspruchung beim Einsatz mobiler Augmented Reality Systeme, In: ErgoMed, Heft 5, 2008, Seiten 130-141
- [Tüm06] J. Tümler: Realisierung eines Augmented Reality basierten Kommissioniersystems für einen Referenzarbeitsplatz, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, Fakultät für Informatik, Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme, Diplomarbeit, 2006.
- [Tüm09] J. Tümler: Untersuchungen zu Nutzerbezogenen und technischen Aspekten beim Langzeiteinsatz Mobiler Augmented Reality Systeme in industriellen Anwendungen. Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, Institut für Technische und Betriebliche Informationssysteme, 2009.
- [Ulr84] H. Ulrich: Management / Hans Ulrich. In: Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmensführung; Bd. 13. Hrsg. von Thomas Dyllick u. Gilbert Probst. Bern, 1984, ISBN: 3-258- 03446-X; Seiten 192-209.
- [VDI2247] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2247, Qualitätsmanagement in der Produktentwicklung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.

- [VDI4499] VDI 4499: VDI-Richtlinien, Digitale Fabrik Grundlagen. VDI-Handbuch Materialfluss und Fördertechnik, Band 8: Materialfluss II (Organisation/Steuerung), VDI-Handbuch Betriebstechnik, Teil 1: Grundlagen der Planung. Beuth Verlag GmbH, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2008.
- [VKT+01] V. Vlahakis, J. Karigiannis, M. Tsotros, M. Gounaris, L. Almeida, D. Stricker, T. Gleue, I. T. Christou, R. Carlucci und N. Ioannidis: Archeoguide: first results of an augmented reality, mobile computing system in cultural heritage sites. In: Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage, ACM, 131 – 140, ISBN: 1-58113-447-9, Glyfada, Greece, 2001.
- [Wag07] D. Wagner: Handheld Augmented Reality, PhD thesis, Graz University of Technology, Institute for Computer Graphics and Vision, October 1st. 2007.
- [WCH92] J. Weng, P. Cohen und M. Herniou: Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. In: IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 14, no. 10, October 1992.
- [Wei91] M. Weiser: The computer for the 21<sup>st</sup> century. Scientific American, Seiten 66 – 47. September 1991.
- [Wef02] U. Weferling: Bauaufnahme als Modellierungsaufgabe. DGK Reihe C, Heft 561, München, 2002.
- [WFM+96] A. Webster, S. Feiner, B. MacIntyre, B. Massie und T. Krueger: Augmented reality in architectural construction, inspection and renovation. In: Proc. Third ASCE Congress for Computing in Civil Engineering, Anaheim, CA, Jun. 17-18 1996.
- [WH92] H.-P. Wiendahl und R. Hernández: Fabrikplanung im Blickpunkt - Herausforderung Wandlungsfähigkeit. In: wt' Werkstattstechnik online. Jahrgang 92, Heft 4, 2002.
- [Wie89] H.-P. Wiendahl: Betriebsorganisation für Ingenieure. 3. Auflage, Hanser Verlag, München 1989.

- 
- [WPLS05] D. Wagner, T. Pintaric, F. Ledermann und D. Schmalstieg: Towards Massively Multi-User Augmented Reality on Handheld Devices. In: Third International Conference on Pervasive Computing. Munich, Germany, 2005.
- [Zei99] K. Zeiske: TPS 1100 Professional Series – Eine neue Tachymetergeneration von Leica. VR 61/2 (April 1999), S. 82 – 90.
- [ZF03] B. Zitova und J. Flusser. “Image registration methods: a survey”. Image and Vision Computing, Vol. 21, No. 11, pp. 977–1000, October 2003.
- [ZS06] M. F. Zäh und R. J. Schack: Methodik zur Skalierung der Digitalen Fabrik. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZwF) 101 (2006) 1-2, S. 11-14.
- [ZT98] D. Ziou and S. Tabbone: Edge Detection Techniques - An Overview. Pattern Recognition and Image Analysis, Vol. 8, pp. 537–559, 1998.
- [ZVWM04] M. F. Zäh, W. Vogl, G. Wunsch und U. Munzert: Virtuelle Inbetriebnahme im Regelkreis des Fabriklebenszyklus. In: Zäh, M. F.; Reinhart, G. (Hrsg.): Virtuelle Produktionssystemplanung – Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik. Utz Verlag, München 2004, S. 1-1 - 1-21. (iwb Seminarberichte 74)
- [ZWT99] Z. Zheng, H. Wang, und E. K. Teoh: Analysis of gray level corner detection. Pattern Recognition Letters, Vol. 20, No. 2, pp. 149–162, 1999.



## **Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis**

<i>2D</i>	Zweidimensional
<i>3D</i>	Dreidimensional
<i>AG</i>	Aktiengesellschaft
<i>API</i>	Automated Precision Incorporated
<i>AR</i>	Augmented Reality (Erweiterte Realität)
<i>AV</i>	Augmented Virtuality (Erweiterte Virtualität)
<i>AVILUS</i>	Angewandte Virtuelle Technologien im Produkt- und Produktionsmittel-Lebenszyklus
<i>BBC</i>	British Broadcasting Corporation, britische Rundfunkanstalt
<i>BMBF</i>	Bundesministerium für Bildung und Forschung
<i>CAD</i>	Computer Aided Design
<i>Cal3D</i>	Character Animation Library 3D
<i>CAP</i>	Computer Aided Planning
<i>CORBA</i>	Common Object Request Broker Architecture
<i>COS</i>	Coordinate System
<i>CRT</i>	Cathode Ray Tube
<i>CT</i>	Computertomographie
<i>DART</i>	Designer's Augmented Reality Toolkit
<i>DB</i>	Datenbank
<i>DF</i>	Digitale Fabrik
<i>DKM</i>	Datenkontrollmodell
<i>DMU</i>	Digital-Mock-Up
<i>DOF</i>	Degrees of Freedom

## Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis

---

<i>DWARF</i>	Distributed Wearable Augmented Reality Framework
<i>EDM</i>	Engineering Data Management
<i>ERP</i>	Enterprise Ressource Planning
<i>EVA</i>	Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe
<i>EZ</i>	Eigenzustand
<i>GOM</i>	Gesellschaft für Optische Messtechnik
<i>GPL</i>	General Public License
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>GUI</i>	Graphical User Interface
<i>HMD</i>	Head Mounted Display
<i>HMI</i>	Human-Machine Interface (Mensch-Maschine-Schnittstelle)
<i>HUD</i>	Head Up Display
<i>KMG</i>	Koordinatenmessgerät
<i>KVP</i>	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
<i>LAN</i>	Local Area Network
<i>LCD</i>	Liquid Crystal Display, dt. Flüssigkristallbildschirm
<i>LED</i>	Leuchtdiode, engl. Light Emitting Diode
<i>LOS</i>	Line Of Sight
<i>MR</i>	Mixed Reality
<i>MRI</i>	Magnetic Resonance Imaging, dt. Magnetresonanztomographie
<i>NC</i>	Numerical Control
<i>OEM</i>	Original Equipment Manufacturer
<i>OLED</i>	Organische Leuchtdiode, engl. Organic Light Emitting Diode
<i>OST</i>	Optical See-Through
<i>PC</i>	Personal Computer
<i>PDA</i>	Personal Digital Assistant
<b>XXX</b>	

---

<i>PDM</i>	Produktdatenmanagement
<i>PEP</i>	Produktentstehungsprozess
<i>PPR</i>	Produkt-, Prozess- und Ressourcen
<i>PPS</i>	Produktionsplanungs- und Steuerung
<i>PSD</i>	Positionsempfindlichen Detektor
<i>PST</i>	Projection See-Through
<i>SDK</i>	Software Development Kit
<i>SIFT</i>	Scale-Invariant Feature Transform
<i>SLAM</i>	Simultaneous Localization and Mapping
<i>SPC</i>	Simultaneous Pose and Correspondence problem
<i>SPS</i>	Speicherprogrammierbare Steuerung
<i>STS</i>	Smart Track Sensor
<i>SURF</i>	Speeded Up Robust Features
<i>TGA</i>	Technische Gebäudeausstattung
<i>TOF</i>	Time Of Flight
<i>TV</i>	Television
<i>UDP</i>	User Datagram Protocol
<i>UML</i>	Unified Modelling Language
<i>UMPC</i>	Ultra Mobile PC
<i>VR</i>	Virtual Reality (Virtuelle Realität)
<i>VRPN</i>	Virtual Reality Peripheral Network
<i>VST</i>	Video See-Through
<i>VT</i>	Virtuelle Techniken
<i>VW</i>	Volkswagen
<i>WLAN</i>	Wireless LAN
<i>X3D</i>	Extensible 3D



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Angewandte Wissenschaft in Theorie- und Praxisbezug nach [Ulr84].....	4
Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit [eigener Entwurf] .....	5
Abbildung 2-1: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum nach Milgram et al. [MK94].....	8
Abbildung 2-2: Beispielmarker [met09] .....	11
Abbildung 2-3: FARO Platinum Messarm, Mechanisches Trackingsystem [FAR09].....	12
Abbildung 2-4: FARO Lasertracker [FAR09] .....	13
Abbildung 2-5: Emagin Visor HMD [Ema08].....	15
Abbildung 2-6: mobile AR-Anwendung auf einem PDA [SW07] .....	16
Abbildung 2-7: Visualisierungsarten von AR-Informationen nach [Alt02] .....	17
Abbildung 2-8: Referenzarchitektur für AR-Systeme nach [RMBK03] .....	18
Abbildung 2-9: Beispiele für AR im Entertainment. Oben: virtuelle Ergänzung bei Sportübertragung [NRC09], Unten links: ARQuake [Tho03], Unten rechts: Handygame „kickreal“ [LR05].....	20
Abbildung 2-10: Lernen mit Construct3D. Tutor assistiert Lernendem bei der Konstruktion [Kau04].....	21
Abbildung 2-11: Abgrenzung von Produktlebenszyklus, Produktentstehungs- und Auftragsabwicklungsprozess [Sch07].....	28
Abbildung 2-12: Kostenfestlegung und Änderungsaufwand im Produktentstehungsprozess nach [Kie07].....	29
Abbildung 2-13: Aufgaben der Produktionsplanung in Anlehnung an [SK97, Wie89] .....	30
Abbildung 2-14: Techniken der Digitalen Fabrik im Produktentstehungsprozess, Entwurf nach [ZS06] .....	32
Abbildung 2-15: Produktionsanlaufkurve mit und ohne Digitale Fabrik nach [Gol04] .....	33
Abbildung 2-16: grafische Darstellung der Definition eines Soll/Ist-Vergleichs [eigener Entwurf] .....	38

Abbildung 2-17: Änderung des Systemzustands über die Zeit [eigener Entwurf] .....	39
Abbildung 2-18: Abgrenzung Ist-Aufnahme, Soll/Ist-Vergleich, Regeln [eigener Entwurf]..	40
Abbildung 2-19: Messen als Transformationsoperation [Mah00] .....	42
Abbildung 2-20: Allgemeiner Messvorgang [eigener Entwurf] .....	43
Abbildung 2-21: 2D-2D Bildregistrierung (nach [ZF03]) .....	45
Abbildung 2-22: 3D-3D Registrierung einer Punktwolke [Pen08].....	46
Abbildung 2-23: 2D-3D Registrierung [Pen08].....	48
Abbildung 3-1: Potenzial von Soll/Ist-Vergleichen beim Planungsprozess [eigener Entwurf]	51
Abbildung 3-2: Handlungsbedarf zu AR- Soll/Ist-Vergleichen in der Fertigungsplanung [eigener Entwurf] .....	58
Abbildung 3-3: Prototyp 1 [Doi03].....	64
Abbildung 3-4: Prototyp 2 [SD05].....	66
Abbildung 3-5: Prototyp 3 - Benutzeroberfläche [Pen08] .....	67
Abbildung 3-6: Unifeye SKD [nach Gel07] .....	68
Abbildung 4-1: Lebenszyklusmodell eines Betriebsmittels in Anlehnung an [Gre01] .....	72
Abbildung 4-2: Produktionsbezogene Eingliederung des Karosserierohbaus .....	72
Abbildung 4-3: Strukturierung eines Karosserierohbaus in der Automobilindustrie [Quelle: Volkswagen AG].....	73
Abbildung 4-4: Geometriestation im Karosserierohbau [Quelle: Volkswagen AG] .....	74
Abbildung 4-5: abstrakte Fabrikstruktur [eigener Entwurf] .....	75
Abbildung 4-6: Referenzpunkt an Hallensäule (li); Vermessung mit Lasertracker (re) [eigene Aufnahme].....	76
Abbildung 4-7: Referenzpunkte auf Vorrichtungsgundplatte schematisch (re) und als reale Aufnahme (li) .....	77
Abbildung 4-8: Vereinfachte Darstellung des Planungsprozesses von Betriebsmitteln im Karosseriebau [Kie07].....	79
Abbildung 4-9: Grad der Softwareintegration in der Produktentstehung (in Anlehnung an [Sch07]).....	82

---

Abbildung 4-10: Informationsverluste an Prozessschnittstellen nach [BVD+04].....	83
Abbildung 4-11: Fehl-IST: Im 3D-Modell vorhandene Auflage (blaues Objekt, rechtes Bild) ist in der Realität (linkes Bild) nicht vorhanden [eigene Aufnahme] .....	87
Abbildung 4-12: Fehl-Soll: Ein reales Objekt (grauer Kabelkanal im rechten Bild) ist im 3D-Datensatz nicht modelliert [eigene Aufnahme].....	88
Abbildung 4-13: Positionsabweichung: modellierte Wasserleitung (re) versetzt installiert [eigene Aufnahme].....	88
Abbildung 4-14: Gestaltabweichung: Der Konsolenfuß einer Spannvorrichtung ist als Vollkörper modelliert (rechts im Bild), in der Realität jedoch mit einer Aussparung ausgeführt [eigene Aufnahme] .....	89
Abbildung 4-15: Prozessschritte für einen AR-basierten Soll/Ist-Vergleich [eigener Entwurf]90	
Abbildung 4-16: Varianten des Modellexports am Beispiel eines PPR-Systems [eigener Entwurf] .....	93
Abbildung 4-17: Prinzipskizze zur Target-Kamera-Kalibrierung (rote Transformation), [eigener Entwurf] .....	96
Abbildung 4-18: Registrierung des AR-Systems im Weltkoordinatensystem [eigener Entwurf]97	
Abbildung 4-19: Spezialfall Markertracking [eigener Entwurf].....	98
Abbildung 4-20: Visualisierungsalternativen virtueller Geometrie in AR-Szene: Volumenkörper (links), Verdeckungsgeometrie (Mitte), Drahtgitter (rechts); [Pen08]	100
Abbildung 4-21: Handlungsbedarf bei AR-basierten Soll/Ist-Vergleichen von Betriebsmitteln [eigener Entwurf] .....	104
Abbildung 4-22: geplantes Vorgehen zur Verbesserung der Registrierung und Untersuchung von Aufnahme- und Auswerteprozess [eigener Entwurf].....	105
Abbildung 5-1: Koordinatensysteme in industriellen AR-Szenarien, rot: Registrierung [eigener Entwurf] .....	108
Abbildung 5-2: Individuelle Markeradapter bei der AR-Untersuchung eines Vorderwagens [Volkswagen AG] .....	117
Abbildung 5-3: allgemeine Photogrammetrieadapter für Regelgeometrie [CAP11].....	117
Abbildung 5-4: Abhängigkeit der Trackinggenauigkeit von den Markerpixeln im Bild, Entwurf nach [Pen08].....	118

Abbildung 5-5: allgemeine Markeradapter für Karosseriebauvorrichtungen [eigener Entwurf]	121
Abbildung 5-6: Setup AR-System: Kamera und Laptop (li); Adapter mit Markern (re) [eigene Aufnahme].....	121
Abbildung 5-7: Markeradapter und Vorrichtung Grundplatte (li. einzeln; re. montiert) [eigener Entwurf] .....	122
Abbildung 5-8: Konzept zur Vermessung des Adapterreferenzpunktes P [eigener Entwurf]	123
Abbildung 5-9: Vermessung der Kalibrierplatte (li) mit Referenzbohrungsmittelpunkt P' (re) [eigener Entwurf] .....	123
Abbildung 5-10: Vermessung eines Markeradapters auf Kalibrierplatte [eigener Entwurf].	124
Abbildung 5-11: Montieren eines Betriebsmitteladapters an einer Referenzbohrung [eigene Aufnahme].....	125
Abbildung 5-12: Konzept der 3D-3D-Registrierung (eigener Entwurf nach [Pen08]).....	126
Abbildung 5-13: Intermarker-Calibration-Tool zur 3D-3D-Registrierung [Pen08] .....	127
Abbildung 5-14: Prozessschritte zur Registrierung mit Vorrichtungsadaptoren [eigener Entwurf] .....	128
Abbildung 5-15: Szenario Pilotprojekt 1 - Seitenteilspannvorrichtung [Volkswagen AG, eigene Aufnahme] .....	129
Abbildung 5-16: Analyse des AR-Szenarios; Überlagerung der Spanntechnik [eigene Aufnahme].....	131
Abbildung 5-17: AR-Systemsetup mit Lasertracker; rechts: Kamera und Trackingtarget (STS) (eigener Entwurf) .....	134
Abbildung 5-18: Unterschied zwischen Kalibrier- und Arbeitsabstand [eigener Entwurf]...	135
Abbildung 5-19: Aufbau der Referenzpunkte des Kalibrierfeldes [eigener Entwurf] .....	136
Abbildung 5-20: Kalibrierfeld ohne (links) und mit Photogrammetrieadaptoren (rechts) [eigene Aufnahmen].....	137
Abbildung 5-21: gesuchte Transformation bei der Sensor - Kamera - Kalibrierung [eigener Entwurf] .....	137
Abbildung 5-22: Einmessen des Lasertrackers in des Referenzpunktfeld einer Produktionshalle mit der Software Spatial Analyzer [eigene Aufnahme] .....	139

---

Abbildung 5-23: Prozessschritte zur Registrierung mit Lasertracker .....	140
Abbildung 5-24: Foto der Karosseriebauhalle zum Untersuchungszeitpunkt [eigene Aufnahme].....	141
Abbildung 5-25: Kalibrierfeld mit AICON-Targets auf der Baustelle [eigene Aufnahme] ..	142
Abbildung 5-26: Sequenzdiagramm der Systemkalibrierung [eigener Entwurf].....	143
Abbildung 5-27: Fotobasierte Offline-Untersuchung (oben) und Online-Auswertung (unten) [eigener Entwurf] .....	144
Abbildung 5-28: Aufnahmepositionen innerhalb eines Sektors im Hallenraster [eigener Entwurf] .....	144
Abbildung 5-29: Planer und Architekt bei Online-Auswertung auf der Baustelle [eigene Aufnahmen].....	145
Abbildung 5-30: Kollision einer versetzten Regenleitung mit geplantem Verlauf der Lüftung [eigener Entwurf] .....	146
Abbildung 6-1: Versuchsaufbau schematisch (links) und real, aus Perspektive eines AR-Probanden (rechts).....	154
Abbildung 6-2: Faktorenhierarchie der EZ-Skala (nach [Nit76]).....	158
Abbildung 6-3: Schema AR-Versuchsablauf.....	160
Abbildung 6-4: Anteile der erkannten Soll/Ist-Abweichungen nach Kategorie und Technologie.....	161
Abbildung 6-5: Erkannte Abweichungen, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen 2D-Probanden.....	164
Abbildung 6-6: Erkannte Abweichungen über Zeit, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen 2D-Probanden .....	164
Abbildung 6-7: Erkannte Abweichungen, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen 3D-Probanden.....	166
Abbildung 6-8: Erkannte Abweichungen über Zeit, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen 3D-Probanden .....	166
Abbildung 6-9: Erkannte Abweichungen, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen AR-Probanden.....	167

Abbildung 6-10: Erkannte Abweichungen in 10-Minuten-Abschnitten, Vergleich von erfahrenen und unerfahrenen AR-Probanden.....	168
Abbildung 6-11: Vergleich der Staninewerte aus der EZ-Skala vor und nach dem Soll/Ist-Vergleich mit techn. 2D-Zeichnungen .....	170
Abbildung 6-12: Vergleich der Staninewerte aus der EZ-Skala vor und nach dem Soll/Ist-Vergleich mit 3D.....	171
Abbildung 6-13: Vergleich der Staninewerte aus der EZ-Skala vor und nach dem Soll/Ist-Vergleich mit AR .....	171
Abbildung 6-14: Vergleich der eingefärbten Stanine-Bäume für alle drei Technologien .....	172
Abbildung 6-15: Anzahl der Fotografierdurchgänge bei erfahrenen und unerfahrenen Probanden	173
Abbildung 6-16: Fotoanzahl und Fotografierzeit von erfahrenen und unerfahrenen AR-Probanden.....	174
Abbildung 6-17: Abhängigkeit von Fotoanzahl zu erkannten Abweichungen .....	174
Abbildung 6-18: Einsatz der Analysefunktionen des AR-Systems .....	175
Abbildung 6-19: Probandenfeedback.....	176

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Planungsfälle nach Eversheim et al. ....	27
Tabelle 2-2: Zuordnung von Techniken der Digitalen Fabrik zu Funktionen (Entwurf nach [Sch07]).....	35
Tabelle 2-3: Übersicht Registrierungsproblem bei Augmented Reality, nach [Pen08].....	44
Tabelle 3-1: Überblick AR-Softwaresysteme [eigener Entwurf].....	62
Tabelle 5-1: Eignung von Trackingsystemen für Soll/Ist-Vergleiche von Karosseriebaubetriebsmitteln, Bewertung von -2 (sehr schlecht) über 0 (neutral) bis 2 (sehr gut), eigener Entwurf nach [Dos08].....	111
Tabelle 5-2: Beispielberechnung der Markergröße in Abhängigkeit von Arbeitsentfernung und Brennweite .....	120
Tabelle 5-3: Kalibrierergebnisse der Betriebsmitteladapter (Auszug).....	124
Tabelle 5-4: orientierte Aufnahmen, 3D-Modelle und AR-Ansichten je Fabrikhalle .....	145
Tabelle 5-5: Kategorisierung der erkannten Abweichungen.....	147
Tabelle 6-1: Analysefunktionen des AR-Systems .....	153
Tabelle 6-2: Abweichungen zwischen Referenzvorrichtung und Konstruktionsdaten .....	155
Tabelle 6-3: technische Vorerfahrung.....	163



# A. Anhang

## A.1 Techniken der Digitalen Fabrik

Auf Basis von [Sch07] werden im Folgenden auszugsweise die Techniken der Digitalen Fabrik beschrieben.

- Das *Simultaneous* bzw. das *Concurrent Engineering (SE/CE)* hat die zeitliche Verkürzung des Produktentstehungsprozesses bei gleichzeitiger Steigerung der Produktqualität zum Ziel. Dies wird durch eine Parallelisierung von Planungsaufgaben und durch eine verbesserte Abstimmung zwischen den am Produktentstehungsprozess beteiligten Personen ermöglicht [GLRW00].
- Durch das *Geschäftsprozessmanagement (GPM)* werden zielgerichtete, zeitlich-logische Abfolgen von Aufgaben zur Leistungserstellung gestaltet und verbessert. Dieses wird speziell durch die Informations- und die Kommunikationstechnologie unterstützt [NS02].
- Mit dem *Produkt- und dem Simulationsdatenmanagement (PDM/SDM)* können sowohl der Informationsfluss als auch die Verwaltung von Produkt- und Simulationsdaten gesteuert werden. Dies erfolgt mit Hilfe eines einzigen Datenmodells und bezieht sich auf den Inhalt, den Status und die Version der Daten. Die Rechnerunterstützung wird hierzu von Produkt- und Simulationsdatenmanagement- (PDM-/SDM-) Systemen geleistet [AT00, ES01, Sch99].
- Das *Toleranzmanagement* und die *Toleranzsimulation* dienen der Bemaßung und der Tolerierung von Produktgeometrien im Hinblick auf deren wirtschaftliche, qualitätsfähige und schnell realisierbare Herstellung. Dazu werden überwiegend Simulationswerkzeuge eingesetzt [Kle06].
- Das *Computer Aided Planning* und die *Produkt-, Prozess-, Ressourcenplanung (CAP/PPR)* werden zur rechnerunterstützten Erstellung von Arbeitsplänen (Festlegung des Herstellprozesses) unter der Berücksichtigung von Anforderungsparametern des Fertigungs- und des Montageprozesses, des Produkts und der Ressourcen (Betriebsmittel) eingesetzt. Synonym zu CAP wird auch der Begriff Computer Aided Process Planning verwendet [Pau91, Sch99]

- Mit Hilfe des *Computer Aided Office (CAO)* wird die Büroarbeit hinsichtlich der allgemein verbesserten Kommunikation sowie der Verteilung und der Verwaltung von Dokumenten unterstützt. Diese werden durch Systeme zur Textverarbeitung, zur Tabellenkalkulation etc. erzeugt und beispielsweise über E-Mail verteilt [Pau91, Sch09]
- Durch *Computer Aided Quality Assurance (CAQ)* wird die rechnerunterstützte Planung und Ausführung von Prüfvorgängen zur Qualitäts- und Funktionssicherung eines Bauteils ermöglicht [Pau91, Sch99].
- Die *Ablaufsimulation* dient dazu, eine Fabrik, eine Anlage und/oder eine Zelle im Rechner zu optimieren. Die Optimierung bezieht sich auf das Layout, die Logistik und den Materialfluss, die Produktionssteuerungs- und -entstörstrategien sowie die Leistung des Produktionssystems [Rei99].
- Die *Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN)* ist beispielsweise die Kombination der Werkzeuge Ablaufsimulation, Hardware-in-the-Loop (Kopplung der realen Anlagensteuerung mit dem digitalen Anlagenmodell), Mechatronik- und Strukturdynamiksimulation, 3D-Prozesssimulation sowie der Benutzerschnittstellen Virtual und Augmented Reality. Das Ziel dabei ist die frühzeitige Simulation, Programmierung und Absicherung der virtuellen Anlage in Verbindung mit der realen Steuerungshardware, um die Inbetriebnahme der Anlage zeitlich zu verkürzen [ZVWM04].
- Die Simulation mit der *Finite-Elemente-Methode (FEM)* basiert auf numerischen Berechnungen. Diese dienen der Lösung mathematisch beschreibbarer Probleme der angewandten Physik wie Festigkeits-, Strömungs- und Wärmeleitungsberechnungen [Sch99, SK97].
- Das *Computer Aided Design (CAD)* ist überwiegend die rechnerunterstützte Konstruktion von Einzelteilen und Baugruppen (Technik). Wird diese Gestaltung auf industrielle Bebauungsstrukturen (Architektur) bezogen, kann von der *Fabriklayoutgestaltung* gesprochen werden. Die Konstruktions- bzw. die Gestaltungsergebnisse liegen als zwei- und dreidimensionale Modelle vor, von denen zweidimensionale Unterlagen wie Zeichnungen und/oder Stücklisten abgeleitet werden können [Pau91, Sch99, SK97].
- Mit Hilfe der *Mehrkörpersimulation (MKS)* und der *3D-Kinematiksimulation* werden physikalische Produkt- und Anlageneffekte simuliert. Dazu zählen die Kinematik und das dynamisch Verhalten von Einzelteilen und Baugruppen, um Kollisionen, Prozessparameter und Bewegungsabläufe zu untersuchen [AT00, Rei99].

- Durch das *Computer Aided Manufacturing (CAM)* wird in Verbindung mit dem *Numeric Control (NC)* die rechnerunterstützte technische Steuerung und Überwachung der Teilefertigung und der Montage einschließlich der Handhabungs-, Transport- und Lagervorgänge über NC-Steuerprogramme ermöglicht. Die Programmierung der NC-Programmcodes kann auch dem CAP zugeordnet werden [Pau91, Sch99].
- Die *Produktionsplanung und -steuerung* bzw. das *Enterprise Resource Planning (PPS/ERP)* unterstützen die Auftragsabwicklung. Dies betrifft die Planung des Produktionsprogramms, der Bedarfsmengen, der Termine und der Kapazitäten. Darüber hinaus werden mit diesen Techniken die Auftragsfreigabe und die Auftragsüberwachung gesteuert. Die Auftragsabwicklung wird durch die PPS- bzw. die ERP-Systeme rechnerunterstützt [Sch99].
- Die *Betriebsdatenerfassung (BDE)* beinhaltet Maßnahmen zur Erfassung technischer und organisatorischer Daten zum Zustand des Betriebes. Dazu zählen produzierte Mengen, benötigte Zeiten, Zustände von Betriebsmitteln, Lagerbewegungen und Qualitätsmerkmale. Die Rechnerunterstützung erfolgt durch die BDE-Systeme. Diese sind zu *Manufacturing-Execution-Systemen (MES)* weiterentwickelt worden, um gezielt den Produktentstehungsprozess mit dem Auftragsabwicklungsprozess informatorisch zu verbinden [Sch99, Pis06].
- Mittels *Radio Frequency Identification (RFID)* werden logistische Objekte identifiziert, lokalisiert und gesteuert. Bei Eintritt in ein von einem Empfänger erzeugtes Induktionsfeld werden die Objekte angeregt und senden Daten zurück, die auf einem Datenträger gespeichert sind [DCV05].
- Die *Telepräsenz* stellt eine Mensch-Maschine-Schnittstelle dar, mit der der Mensch (Operator) zur Überwindung von Barrieren wie Dimensionen oder Entfernungen ein Betriebsmittel (Teleoperator) bedienen kann. Dazu wird die Kommunikationstechnologie eingesetzt [Cla06].
- *Virtual Reality (VR)* und *Augmented Reality (AR)* sind im Kontext der Digitalen Fabrik ebenfalls Mensch-Maschine-Schnittstellen. Auf eine ausführliche Beschreibung wird an dieser Stelle mit Verweis auf Kapitel 2.1 verzichtet.

## A.2 Datenerfassungsblatt – fotobasierter AR Soll/Ist-Vergleich

<b>Protokoll, AR Soll/Ist-Vergleich</b>					 <small>KAROSSERIEPLANUNG</small>	
<b>Ersteller</b>			<b>Datum</b>			
Projekt	Halle	Feld	AFO	<input type="checkbox"/> Spanner <input type="checkbox"/> Konturstein <input type="checkbox"/> Grundplatte <input type="checkbox"/> _____ AFO-Zusatz, BeMi-Nummer		
Referenzmarker						
ID	Größe	Z-Offset	$x_{\text{Referenz}}$	$y_{\text{Referenz}}$	$z_{\text{Referenz}}$	Bemerkungen
						<input type="checkbox"/> BeMi <input type="checkbox"/> Produkt
						<input type="checkbox"/> BeMi <input type="checkbox"/> Produkt
						<input type="checkbox"/> BeMi <input type="checkbox"/> Produkt
						<input type="checkbox"/> BeMi <input type="checkbox"/> Produkt
						<input type="checkbox"/> BeMi <input type="checkbox"/> Produkt
						<input type="checkbox"/> BeMi <input type="checkbox"/> Produkt
Hilfsmarker						
ID	Größe	Bemerkungen				
<b>Notizen zu Fotos</b>						
Bemerkungen				Skizze		

### A.3 Gesamtübersicht aller Abweichungen

#### *Kategorie 1: im IST fehlendes Teil*

<b>ID</b>	<b>Beschreibung</b>
K1-1	4 Ringschrauben auf den Ecken von Teil Nr. 240
K1-2	2 Schrauben am Fuß von Nr. 289
K1-3	2 Schrauben am Fuß von Nr. 290
K1-4	unterer Klotz auf jedem Spanner
K1-5	Stift auf Nr. 289
K1-6	Stift auf Nr. 290
K1-7	Schraube auf Abstimmwinkel von Nr. 411
K1-8	Schraube auf Abstimmwinkel von Nr. 412
K1-9	Auflage auf Nr. 287
K1-10	Auflage auf Nr. 287
K1-11	Aufnahmebolzen auf Nr. 289
K1-12	Aufnahmebolzen auf Nr. 290

#### *Kategorie 1: im SOLL fehlendes Teil*

<b>ID</b>	<b>Beschreibung</b>
K2-1	Kabelkanäle auf 240
K2-2	Schläuche an jedem Spanner
K2-3	Abstimmwinkel auf Nr. 286
K2-4	Auflage und Winkel auf Nr. 247
K2-5	Auflage und Winkel auf Nr. 248
K2-6	Spanner Nr. 243

**Kategorie 3: Geometrieabweichung**

<b>ID</b>	<b>Beschreibung</b>
K3-1	Auflage auf Nr. 281 um 180 Grad gedreht
K3-2	Auflage auf Nr. 282 um 180 Grad gedreht
K3-3	Konsole von Nr. 286 in Y +/- Richtung je 15 mm enger
K3-4	Konsole von Nr. 287 in Y +/- Richtung je 15 mm enger
K3-5	Konsole von Nr. 285 mit Aussparung
K3-6	Zylinder unter Klotz von Nr. 289
K3-7	Zylinder unter Klotz von Nr. 290
K3-8	Adapter auf Nr. 411 um 90 Grad gedreht
K3-9	Adapter auf Nr. 412 um 90 Grad gedreht
K3-10	Verstärkungsrippe von Nr. 247
K3-11	Verstärkungsrippe von Nr. 248
K3-12	Druckstück auf Nr. 244 mit Rippe
K3-13	Räder ohne Schutzbleche
K3-14	Auflage von Dorn auf Nr. 241 verkleinert
K3-15	Auflage von Dorn auf Nr. 242 verkleinert
K3-16	Abw. Ausführung von Sensoren und Drückanschlüssen an allen Spannern

**Kategorie 1: im SOLL fehlendes Teil**

<b>ID</b>	<b>Beschreibung</b>
K4-1	Schraube auf Nr. 240 in Y-Richtung um 30 mm verschoben
K4-2	Nr. 286 in -X-Richtung um 40 mm verschoben
K4-3	Nr. 290 in +Y-Richtung um 30 mm verschoben
K4-4	Nr. 413 in +X-Richtung 40 um mm und -Y-Richtung um 45 mm verschoben
K4-5	Nr. 414 in +X-Richtung 40 um mm und +Y-Richtung um 35 mm verschoben

**A.4 Fragebogen zur technischen Vorerfahrung**

Prob.-Nr.: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

Uhrzeit: \_\_\_\_\_

Alter: \_\_\_\_\_

Im folgenden Versuch sollen Sie die Abweichungen zwischen Konstruktionsdaten und einem realen Objekt erkennen. Dabei können Sie die zur Verfügung gestellten Hilfsmittel benutzen. Bitte beantworten Sie vor und nach dem Versuch einige Fragen. Füllen Sie die Fragebögen sorgfältig und vollständig aus. Sämtliche Daten und Antworten werden anonymisiert ausgewertet. Die Versuchsreihe ist mit dem Betriebsrat abgestimmt.

**Bitte nehmen Sie zu folgenden Aussagen Stellung:**

	<b>zutreffend</b>	<b>nicht zutreffend</b>
Ich habe gute Erfahrungen im Umgang mit Betriebsmitteln / Fertigungsanlagen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe gute Erfahrungen im Umgang mit technischen Zeichnungen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe gute Erfahrungen im Umgang mit 3D-Werkzeugen und oder CAD-Programmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe gute Erfahrungen im Umgang mit der Augmented Reality Technologie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe gute Erfahrungen im Umgang mit der Software Unifeye	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## A.5 EZ-Skala nach Nitsch

Prob.-Nr.: .....

Datum: .....

### E Z - S k a l a n a c h N i t s c h

Auf meinen augenblicklichen Zustand zutreffend:

	kaum (1)	etwas (2)	einiger- maßen (3)	ziemlich (4)	über- wiegend (5)	völlig (6)
gespannt						
schläfrig						
beliebt						
kraftvoll						
gutgelaunt						
routiniert						
anstrengungsbereit						
unbefangen						
energiegeladen						
geachtet						
heiter						
ausdauernd						
sorgenfrei						
selbstsicher						
ausgeruht						
überlegen						
erholungsbedürftig						
zufrieden						
unternehmungslustig						
abgehetzt						
ruhig						
kontaktbereit						
müde						
anerkannt						
fröhlich						
nervös						
geübt						
konzentrationsfähig						
harmonisch						
sicher						
matt						
mitteilsam						
gelassen						
aktiv						
gefestigt						
erholt						
nützlich						
arbeitsfreudig						
vergnügt						
verausgabt						

## A.6 Feedbackfragebogen zur Beurteilung der Hilfsmittel

Prob.-Nr.: .....

Datum: .....

**Bitte nehmen Sie zu nachfolgenden Aussagen Stellung:**

	völlig zutreffend	zutreffend	eingeschränkt zutreffend	unzutreffend	völlig unzutreffend
Ich habe das Gefühl alle Abweichungen gefunden zu haben.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die zur Verfügung stehende Zeit war ausreichend.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das Hilfsmittel hat mich gut bei meiner Aufgabe unterstützt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Benutzung des Hilfsmittels ist intuitiv	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich hätte gerne andere Hilfsmittel benutzt, um die Aufgabe zu lösen...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
... wenn ja, welche:					

**Worin liegen Ihrer Meinung nach die Vor- und Nachteile des Hilfsmittels?**

Vorteile: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Nachteile: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_





## **A.9 Fördervermerk, Studentische Arbeiten, Erfindungsmeldungen**

Diese Arbeit wurde zum Teil vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen 01 IM 08 001 A) gefördert.

Im Rahmen dieser Dissertation wurden folgende studentische Arbeiten betreut:

- Steffen Dohse: Analyse und Bewertung von Trackingsystemen für den industriellen Einsatz im Bereich der Augmented Reality (Studienarbeit 2008 [Dos08])
- Zhixin Zhang: Durchführung von Benutzerstudien zu Augmented Reality basierten Soll/Ist-Vergleichen von Betriebsmitteln (Diplomarbeit 2009)
- Vitali Seitz: Einsatz von Augmented Reality in der Karosseriebauplanung zur Verifikation digitaler Konstruktionsdaten in der realen Fertigungsumgebung (Diplomarbeit 2009)
- Christopher Grambow: Entwicklung eines mobilen Baustellenwagens zur Bauabnahme mit Augmented Reality (Praktikum 2010)
- Sandro Hagemann: Integration AR-basierter Planungsworkshops in den Fertigungsplanungsprozess im Rahmen der Digitalen Fabrik (Bachelorarbeit 2012)

Des Weiteren wurde folgende Erfindungsmeldung zur Patentanmeldung eingereicht:

- Christian Bade, Andreas Hoffmeyer, Ulrich Rautenberg, Peter Bohling, Cord Busche; Volkswagen AG 2009: Laserbasiertes Large Area Tracking zur Augmented Reality gestützten Bauabnahme und Layoutplanung

## **A.10 Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

(Magdeburg, 11.06.2012)

(Unterschrift)